植物营养与肥料学报 2013,19(2):321 -330
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0207

长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响

周怀平[1], 解文艳[1], 关春林[1], 杨振兴[1], 李红梅[2]
(1 山西省农业科学院农业环境与资源研究所,太原 030006; 2 山西省农业科学院农产品加工研究所,太原 030031)

摘要: 在我国北方地区的旱作农田,从 1992 年秋季开始至 2011 年,进行了连续 19 年的不同秸秆还田方式的春玉米长期定位试验,研究秸秆不还田(CK)、长期秸秆覆盖还田(SM)、秸秆粉碎直接还田(SC)、秸秆养畜粪肥还田(CM)对玉米籽粒产量、经济效益和水分利用的影响。结果表明,1)秸秆还田具有显著的增产增收效果,19 年累计增产 13.43 ~ 24.28 t/hm^2,增产幅度 11.57% ~ 20.92%,纯效益增加了 12831 ~ 18171 yuan/hm^2; 2)秸秆还田可以减少玉米生育期耗水量、增加土壤贮水总量、明显提高水分利用效率,其中秸秆养畜粪肥还田的增产增收效果以及秸秆覆盖还田的保水效果最为明显。不同的降水年型,对玉米产量和水分利用也存在较大影响,正常降水年型玉米产量最高,偏旱年型玉米水分利用效率最高。丰水年份和偏丰年份应当注意减少降水的无效耗散,秸秆覆盖还田在偏旱年份的增产效果尤为突出。

关键词: 长期试验; 秸秆还田; 水分利用效率; 春玉米
中图分类号: S513.01; S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)02-0321-10

Effects of long-term straw-returning on corn yield, economic benefit and water use in arid farming areas

ZHOU Huai-ping[1], XIE Wen-yan[1], GUAN Chun-lin[1], YANG Zhen-xing[1], LI Hong-mei[2]
(*1 Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China; 2 Institute of Farming Product Processing, Shanxi Academy of Agricultural Science, Taiyuan 030031, China*)

Abstract: Based on the results from a 19-year location experiment in rainfed experimental areas of northern China, the effects of various kinds of straw return to field on maize yield, economic benefit and water use efficiency were studied. There were 4 treatments, no straw returning (CK), straw mulching (SM), straw crushing (SC), and cattle manure (CM). The results show that compared to the CK, the experiment of returning stalks to field could increase the yield, net benefit and water use efficiency of spring maize significantly, decrease the accumulated water consumption and increase the soil water storage amount. The accumulated yields of the nineteen years are increased by 13.427 - 24.284 t/ha with increases of 11.57% - 20.92%, and the net economic benefits are improved by 12831 - 18171 Yuan/ha. The total corn yield and net economic benefits of the cattle manure treatment are the highest. In different rainfall years, the corn yields and water use efficiencies are very different. In normal years, the corn yields are the highest, while in dry years, the water use efficiencies of spring maize are highest. The yield increasing effect from the straw mulching is significant. In rainy and wet years, water conservation should be paid more attentions.

Key words: long-term fertilizer application; straw return to field; water use efficiency; spring maize

收稿日期: 2012-06-03 **接受日期:** 2012-11-29
基金项目: 国家农业部旱作节水农业重点开放实验室开放基金项目(长期施肥与旱地水分利用研究);国家公益性行业(农业)科研专项(201203030);"十二五"农村领域国家科技计划课题(2012BAD09B01)资助。
作者简介: 周怀平(1964—),男,山西昔阳人,研究员,主要从事旱作农田资源高效利用研究。
Tel: 0351-7222237, E-mail: huaipingzhou@126.com

中国北方干旱地区大部分农田被深厚的黄土所覆盖,农田土壤中赋存了大量的土壤水资源[1-2]可以用于作物生长,但同时由于黄土的抗蚀能力差及该区降水集中,导致水土流失严重、农田生产力低下,使现实的自然降水生产力水平偏低[3-4]。因此加强旱作农田的水肥管理,有效控制水土流失、培肥土壤、减少无效蒸发是提高旱作农田生产力水平的关键。

秸秆和粪肥还田、用地和养地相结合是中国精耕细作农业的精华。20世纪80年代末以来,随着农业秸秆产出量的不断增大、现代农业生产要素和生活物质对秸秆资源的逐步替代,农业秸秆资源呈现相对过剩的状态,2000年中国秸秆总产量已经居世界各国之首,达到7.59亿吨[5],而同期秸秆直接燃用量为2.88亿吨,秸秆废弃和焚烧量也在1.52亿吨左右,秸秆资源低效利用和环境污染问题日益严重[6-10],为此我国农业部门积极推广秸秆和粪肥还田技术,但是在我国北方干旱地区围绕秸秆和粪肥还田腐解同作物水肥需求矛盾方面、秸秆和粪肥还田在不同降水年型的增产效果以及环境效应等问题的研究和争论一直都没有停止过[11-15]。因此在1992年秋季,本研究选择秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆养畜粪肥还田等我国北方干旱地区三种主要秸秆还田方式,布置了长期定位试验,以期明确长期秸秆和粪肥还田对玉米产量、经济效益和水分利用的影响,为农作物秸秆的高效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

秸秆还田长期定位试验在我国北方半湿润偏旱区的山西省寿阳县宗艾村北坪(N37°58′、E113°06′)旱塬地上进行,试验地海拔1130 m,寿阳县历年降水量情况见表1。试验地块基本平坦,土层深厚,地下水埋深在地表50 m以下。供试土壤为褐土,成土母质为马兰黄土。1993年播前耕层土壤(0—20 cm)有机质含量23.5 g/kg,全氮1.07 g/kg,硝态氮21.17 mg/kg,有效磷(P)4.97 mg/kg,速效钾(K)117.2 mg/kg,土壤pH 8.4。土壤剖面的基本物理性状如表2。

表1 寿阳县历年降水量情况

Table 1 Monthly rainfall in 1993-2009 in Shouyang county (mm)

月份 Month	1952～1992年平均值 Avg. in 1952-1992	年份 Year									
		1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
1～4月 Jan.-Apr.	47.5	19.7	38.4	24.5	47.2	79.2	25.8	11.5	26.7	22.0	20.5
5～9月 May.-Sep.	418.3	391.1	363.1	626.5	399.3	161.6	446.8	409.2	233.4	315.9	486.8
10～12月 Oct.-Dec.	34.3	67.3	85.1	23.5	33.5	9.9	16.0	19.8	61.4	30.8	50.8
全年 Total	500.1	478.1	486.6	674.5	480.0	250.7	488.6	440.5	321.5	368.7	558.1

月份 Month	年份 Year									1993～2011年平均值 Avg. in 1993-2011
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
1～4月 Jan.-Apr.	69.3	38.8	20.3	50.3	77.1	106.1	27.6	47.5	22.0	40.8
5～9月 May.-Sep.	350.8	394.1	359.3	376.8	451.5	318.8	486.8	327.8	484.9	385.9
10～12月 Oct.-Dec.	98.6	26.9	5.9	22.3	85.1	22.9	82.1	6.8	94.1	44.4
全年 Total	518.7	459.8	385.5	449.4	613.7	447.8	543.7	382.1	601.0	471.0

表 2　供试土壤剖面的物理性状

Table 2　Soil physical and chemical properties in the experiment

土层 Layer (cm)	容重 Bulk density (g/cm^3)	孔隙度 Porosity (%)	土壤粒径分布 Soil particle size distribution(%)					凋萎湿度 Wilting humidity (%,DS)	田间持水量 Field capacity (%,DS)
			>0.05 mm	0.05～0.01 mm	0.01～0.005 mm	0.005～0.001 mm	<0.001 mm		
0—10	1.18	55.5	45.5	23.5	10.5	12.5	8.0	5.1	25.7
10—20	1.24	53.2	44.5	26.5	11.0	10.0	8.0	6.1	24.8
20—40	1.33	49.8	37.5	32.5	9.5	8.3	12.2	5.5	25.1
40—60	1.36	48.7	44.5	30.0	12.0	4.0	9.5	5.3	23.4
60—80	1.28	51.7	41.7	33.2	8.5	7.3	9.3	5.0	24.0
80—100	1.28	51.7	43.0	33.0	8.2	6.8	9.0	6.5	24.2
100—120	1.37	48.3	43.0	30.5	11.0	6.0	9.5	7.2	25.4
120—140	1.36	48.7	44.5	27.0	10.5	9.5	8.5	8.0	26.2
140—160	1.40	47.2	40.5	38.0	7.5	6.5	7.5	7.9	26.4
160—180	1.39	47.5	37.5	35.0	9.0	9.5	9.0	8.8	27.3
180—200	1.32	50.2	37.5	32.0	10.5	10.0	10.0	9.5	30.7

注(Note)：200～300 cm 土层土壤容重按 1.35 g/cm^3 估算 The estimated soil bulk density in the 200-300 cm layer is 1.35 g/cm^3.

1.2　试验设计

试验设 4 个处理：秸秆不还田(CK)；秸秆覆盖还田(SM),秸秆覆盖还田量为 6 t/hm^2；秸秆粉碎直接还田(SC),秸秆粉碎直接还田量为 6 t/hm^2；秸秆养畜粪肥还田(CM),腐熟湿牛粪还田量 45 t/hm^2。各处理均施化肥 N 150 kg/hm^2 和 P_2O_5 84 kg/hm^2,试验小区面积 54 m^2,无重复。供试作物为春玉米,品种 1993 年～1997 年为烟单 14 号，1998 年～2003 年为晋单 34 号，2004 年以后为强盛 31 号。玉米播种时间在 4 月 15 日～25 日,收获时间为 9 月 20 日～10 月 10 日。种植密度 49500～52500 plant/hm^2,结合秋季深耕翻施肥,玉米生长期间不再施肥,田间管理措施主要是除草和防治病虫害。试验从 1992 年秋季开始实施,到 2011 年已连续进行 19 年,农田栽培管理措施相同。

试验用氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为普通过磷酸钙(含 P_2O_5 14%)。牛粪(风干)有机质含量 90.5～127.3 g/kg,全氮 3.93～4.97 g/kg，全磷(P_2O_5)1.37～1.46 g/kg，全钾(K_2O)14.1～34.3 g/kg。玉米秸秆(风干)有机碳含量 38.1%～44.3%，全氮 7.39～9.79 g/kg,全磷 0.44～0.54 g/kg，全钾 17.1～27.5 g/kg。

1.3　测定项目与方法

1.3.1 玉米生物量的测定　每年在玉米成熟期,将试验处理区分为三个小区(18 m^2),将 3 个小区玉米穗分别装袋风干,脱粒称重,计算玉米籽粒产量。

1.3.2 土壤含水量的测定　1993～2011 年于玉米播种前和收获后测定各试验小区 3 m 土体的土壤含水量,每 20 cm 为 1 层,土壤水分用烘干法测定。玉米耗水量根据农田水分平衡方程式计算。水分利用效率(WUE)的计算公式为：

$$WUE\ [kg/(mm \cdot hm^2)] = Y/ET \quad (1)$$

式中：Y 为作物经济产量；ET 为作物生长期间的蒸散量(生育期耗水量)。ET 的估算公式为：

$$ET = P + I + U + W_1 - (R + D + W_2) \quad (2)$$

式中：P 为生育期间降水量；I 为灌水量(为零,无灌溉水)；U 为地下深层水分上渗量(为零,地下水深埋)；R 为地表径流量(基本为零,地面平坦)；D 为土壤水分渗漏量(忽略不计)；W_1 为作物播种时土壤剖面初始贮水量；W_2 为作物收获后土壤剖面贮水量。公式(2)可以简化为 ET (mm) = P - (W_2 - W_1)。

2　结果与分析

2.1　长期秸秆还田对玉米产量及经济效益的影响

2.1.1 对玉米产量的影响　秸秆还田长期定位试验玉米籽粒产量结果(表 3)表明,秸秆覆盖还田、秸

秆粉碎直接还田和秸秆养畜粪肥还田都有显著的增产效果。主要是因为秸秆还田能使玉米苗全苗壮，根系发达，植株叶片光合速率、蒸腾速率提高，土壤微生物及酶活性增加，可较好地解决深施肥与春季保墒捉全苗的矛盾和秸秆腐解与幼苗争夺水分养分而影响玉米幼苗生长的矛盾[16-17]。3种秸秆还田处理玉米籽粒产量19年累计比对照增加13.427～24.284 t/hm^2，增产幅度为11.57%～20.92%，同时玉米秸秆增加了29.31～42.49 t/hm^2，为秸秆还田提供了更为充裕的有机肥源。3种秸秆还田处理间玉米产量也存在一定差异，其高低顺序为秸秆养畜粪肥还田 > 秸秆覆盖还田 > 秸秆粉碎直接还田 > 秸秆不还田处理。

不同降水年型，秸秆还田的增产作用存在明显差异(表4)。以正常年份产量最高，丰水年和偏丰年产量次之，再次为偏旱年份，大旱年份产量最低，偏旱年份秸秆覆盖还田的增产效果明显优于秸秆粉碎直接还田处理。

2.1.2 对玉米经济效益的影响　长期秸秆还田可以增加种植玉米的经济效益(表5、表6)，秸秆还田处理的玉米纯效益增加了12831～18171 yuan/hm^2，增收率提高20.7%～29.4%。但秸秆覆盖还田、秸

表3　长期秸秆还田对玉米产量的影响

Table 3　Effect of long-term straw-returning on yields of maize in 1993～2011 (t/hm^2)

处理 Treatment	年份 Year									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
秸秆不还田 CK	6.32 b	7.60 ab	4.45 b	7.68 a	3.68 a	6.43 b	2.45 b	2.93 b	6.12 ab	6.69 b
秸秆覆盖还田 SM	6.56 ab	8.36 a	6.36 a	7.65 a	3.81 a	8.21 a	3.47 a	3.49 ab	6.98 a	6.35 b
秸秆粉碎直接还田 SC	7.02 a	8.04 ab	6.12 a	7.88 a	3.80 a	6.72 b	3.31 a	4.19 a	5.99 ab	6.32 b
秸秆养畜粪肥还田 CM	7.31 a	8.32 a	5.95 ab	8.27 a	4.15 a	7.92 ab	3.29 a	4.42 a	6.80 a	8.13 a

处理 Treatment	年份 Year									总产量 Total yield
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
秸秆不还田 CK	5.05 b	6.82 b	6.95 c	5.70 b	8.84 c	9.29 b	5.94 b	7.89 b	5.25 c	116.1 b
秸秆覆盖还田 SM	6.82 a	7.00 b	10.15 a	6.99 a	8.87 c	8.69 b	6.99 a	8.52 ab	6.24 b	131.5 a
秸秆粉碎直接还田 SC	6.64 a	7.47 b	8.34 b	6.68 ab	9.69 b	9.56 b	6.31 ab	9.08 a	6.36 b	129.5 ab
秸秆养畜粪肥还田 CM	6.88 a	9.02 a	7.93b	7.19 a	10.92 a	10.69 a	6.59 a	9.09 a	7.48 a	140.4 a

注(Note)：CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平(Tukey 检验法) Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level (Tukey 's method).

表4　不同降水年型长期秸秆还田条件下的玉米平均产量(t/hm^2)

Table 4　Average corn yield after 19-year continuously straw returning to field in different precipitation years

处理 Treatment	丰水偏丰年 Rainy and wet year	正常年 Normal year	偏旱年 Dry year	大旱年 Extremely-dry year	19年均值 Mean of 19 years
秸秆不还田 CK	6.04 b	7.12 b	5.85 c	3.31 b	6.11 b
秸秆覆盖还田 SM	6.94 ab	7.64 ab	7.28 a	3.65 ab	6.92 a
秸秆粉碎直接还田 SC	6.90 ab	7.63 ab	6.68 b	4.00 a	6.82 ab
秸秆养畜粪肥还田 CM	7.66 a	8.39 a	6.78 b	4.29 a	7.39 a

注(Note)：CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure. 按照年度降水量划分 According with annual precipitation dividing, 丰水年 Rainy year 1995, 2007and 2011；偏丰年 Wet year, 2002, 2003 and 2009；正常年 Normal year, 1993, 1994, 1996, 1998, 2004, 2006 and 2008；偏旱年 Dry year, 1999(前期特别干旱), 2001, 2005 and 2010；大旱年 Extremely-dry year, 1997 and 2000. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平(Tukey 检验法) Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level (Tukey 's method).

表 5　长期秸秆还田不同年份的玉米纯收益(Yuan/hm²)

Table 5　Net benefit of corn under long-term straw-returning in 1993–2011

处理 Treatment	年份 Year									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
秸秆不还田 CK	1416	2621	2238	5997	545	3360	-1342	-787	3138	3291
秸秆覆盖还田 SM	1480	3030	4383	5814	540	5313	-438	-445	3911	2775
秸秆粉碎直接还田 SC	1725	2826	4099	6100	529	3481	-609	171	2842	2744
秸秆养畜粪肥还田 CM	1744	2825	3719	6360	650	4687	-945	14	3312	4204

处理 Treatment	年份 Year									总计 Total
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
秸秆不还田 CK	2056	3393	2473	4602	7572	9131	2768	6525	2909	61906
秸秆覆盖还田 SM	3894	3357	5758	6340	7231	7661	4084	7449	4382	76521
秸秆粉碎直接还田 SC	3689	3904	3746	5833	8473	9140	2882	8534	4628	74737
秸秆养畜粪肥还田 CM	3466	5210	2756	6142	9720	10436	2708	7888	5184	80077

注(Note):CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure. 纯效益=总价值(玉米籽粒产值+玉米副产品产值)-总成本(物质投入费用+农业机械作业费用+用工作价+税金等) Net benefit = Total value (maize grain output + corn by-product output value) - the total cost (material input cost + operating cost of agricultural machinery + work price + tax, etc.)

表 6　长期秸秆还田下的玉米产量和纯收益比较

Table 6　Analysis of corn yields and net benefits under different treatments

处理 Treatment	增产量 (t/hm²) Yield increment	增产率(%) Increased ratio	纯收益增量(Yuan/hm²) Net income increment	纯收益增长率(%) Increased ratio
秸秆不还田 CK				
秸秆覆盖还田 SM	15.428	13.29	14615	23.6
秸秆粉碎直接还田 SC	13.427	11.57	12831	20.7
秸秆养畜粪肥还田 CM	24.284	20.92	18171	29.4

注(Note):CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure.

秆粉碎直接还田及秸秆养畜粪肥还田处理又分别增加了秸秆田间覆盖、秸秆粉碎及粪肥运输和撒施等劳动用工,秸秆养畜粪肥还田还增加了购买牛粪的成本。降水年型主要是通过影响玉米籽粒产量而对纯效益产生影响,由于 1999 年春季大旱,玉米生长中后期又降雨偏多,低温寡照,并有早霜严重危害,使玉米籽粒产量很低,导致种植玉米的负效益;1997 年和 2000 年玉米生长期内大旱,玉米籽粒产量也偏低,因此种植玉米的效益极低或是负效益。

2.2　长期秸秆还田对玉米水分利用的影响

雨养农业作物生产所需水分主要依靠对天然降水的利用[18]。水分高效利用的内涵为适量的水分耗散、生产尽可能丰富的经济产量,同时维持和尽可能地增加土壤贮水,以利于可持续利用。因此,从玉米生育期耗水量、土体贮水量和玉米水分利用效率 3 个方面,分析秸秆还田对水分利用的长期影响。

2.2.1 对玉米生育期耗水量的影响　秸秆还田长期定位试验的玉米生育期耗水量结果(表 7)显示,长期秸秆还田可以减少玉米生育期耗水量,年均减少 3.8 ~ 14.4 mm,各处理间也存在一定差异。连续 19 年试验的玉米生育期平均耗水量由低到高的顺序为秸秆覆盖还田≤秸秆粉碎直接还田 < 秸秆养畜粪肥还田 < 秸秆不还田。而每年度玉米生育期耗水量的多少主要同玉米生育期降水量有关(见表 8),一般表现为正常降水年份各处理玉米生育期耗水

表7 长期秸秆还田对玉米生育期耗水量的影响(mm)

Table 7 Effect of different treatments on water consumption at the growth stages of maize in 1993-2011

处理 Treatment	年份 Year									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
秸秆不还田 CK	461.0	515.0	628.0	496.0	321.0	438.0	382.0	325.0	297.0	448.0
秸秆覆盖还田 SM	472.0	511.0	628.0	474.0	320.0	415.0	380.0	299.0	302.0	469.0
秸秆粉碎直接还田 SC	420.0	511.0	632.0	489.0	326.0	430.0	363.0	331.0	290.0	446.0
秸秆养畜粪肥还田 CM	442.0	505.0	626.0	478.0	321.0	438.0	382.0	325.0	297.0	448.0

处理 Treatment	年份 Year								
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
秸秆不还田 CK	298.6	437.4	333.6	354.7	462.3	484.2	364.8	373.0	461.8
秸秆覆盖还田 SM	298.3	371.3	345.0	329.7	397.8	483.9	339.2	342.4	429.1
秸秆粉碎直接还田 SC	318.8	394.6	324.7	334.1	411.7	467.8	341.8	361.1	428.1
秸秆养畜粪肥还田 CM	309.7	397.9	313.4	368.1	448.2	496.3	368.0	374.7	470.6

注(Note): CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure.

表8 不同降水年型长期秸秆还田条件下的玉米生育期平均耗水量(mm)

Table 8 Water consumption at the growth stages of maize in different precipitation years

处理 Treatment	丰水偏丰年 Rainy and wet year	平常年 Normal year	偏旱年 Dry year	大旱年 Extremely-dry year	19年均值 Mean of 19 years
秸秆不还田 CK	443.9	455.2	346.4	323.0	414.8
秸秆覆盖还田 SM	426.9	436.7	342.4	309.5	400.4
秸秆粉碎直接还田 SC	429.8	435.2	334.7	328.5	401.1
秸秆养畜粪肥还田 CM	445.1	446.5	341.8	323.0	411.0

注(Note): CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure. 按照年度降水量划分 According with annual precipitation dividing, 丰水年 Rainy year 1995, 2007, 2011; 偏丰年 Wet year 2002, 2003, 2009; 正常年 Normal year 1993, 1994, 1996, 1998, 2004, 2006, 2008; 偏旱年 Dry year 1999(前期特别干旱), 2001, 2005, 2010; 大旱年 Extremely-dry year 1997, 2000.

量较多,丰水和偏丰年份次之,偏旱年份再次之,大旱年份玉米耗水量最少。

2.2.2 对土壤贮水量的影响 同1992年秋季试验农田3 m土体土壤贮水量比较,2011年秋季秸秆不还田和3种秸秆还田处理的3 m土体土壤贮水量基本维持在原有水平或有所增加(见表9、图1)。1992年秋季,试验农田3 m土体贮水量为634.6 mm,2011年10月秸秆不还田和秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田及秸秆养畜粪肥还田处理的3 m土体贮水量分别为641.9 mm、702.6 mm、680.9 mm、645.9 mm,均有所增加;另一方面,2011年秋季秸秆不还田、秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆养畜粪肥还田处理间3 m土体土壤贮水分布规律也明显不同,即,各处理100—120 cm土层以上土壤贮水量增加,分别增加了24.3 mm、40.2 mm、38.6 mm和17.4 mm;各处理100—120 cm土层以下土壤贮水量减少,各处理减少的深度和水量存在差异。秸秆不还田处理减少的贮水量和深度最大,土壤贮水量减少了17.0 mm,贮水量减少的土层深度达240 cm,甚至达到300 cm;其次为秸秆养畜粪肥还田处理,土壤贮水量减少了10.8 mm,贮水减少土层在120—220 cm范围;秸秆粉碎直接还田处理,土壤贮水量减少了5.35 mm,贮水减少土层在120—160 cm间;而秸秆覆盖还田处理,土壤贮水减少的土层几乎没有出现,只是120—140 cm土层土壤贮水量略有减少,只减少了1.3 mm。

表 9　试验前后各处理不同土层的土壤贮水量(mm)

Table 9　Change of soil water storage in 19 years

土壤层次 Soil layer (cm)	1992 年 10 月 5 日 Oct. 5,1992	2011 年 10 月 6 日 Oct. 6, 2011			
	基础土 Basic soil	秸秆不还田 CK	秸秆覆盖还田 SM	秸秆粉碎直接还田 SC	秸秆养畜粪肥还田 CM
0—60	115.0	129.6	137.6	138.1	126.8
60—120	101.8	110.8	119.4	117.3	106.9
120—200	169.3	156.9	176.6	169.4	160.3
200—300	248.5	244.6	269.1	256.1	252.0
0—300	634.6	641.9	702.6	680.9	645.9

注(Note)：CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure.

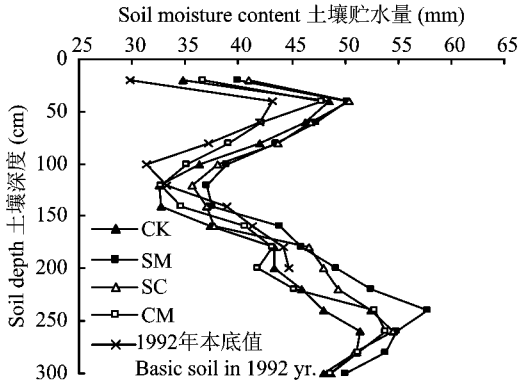

图 1　长期秸秆还田对土壤贮水量分布的影响

Fig. 1　Effects of long-term straw-returning on soil water storage in 0–300 cm soil profiles during harvest period after 19 years

[注(Note)：CK—秸秆不还田 No straw returning; SM—秸秆覆盖还田 Straw mulching; SC—秸秆粉碎直接还田 Straw crushing; CM—秸秆养畜粪肥还田 Cattle manure.]

2011 年 10 月所测定的秸秆不还田和 3 种秸秆还田处理间的 3 m 土体贮水量进行比较,长期秸秆还田可以增加土壤贮水量,19 年内 3 m 土体多贮水 4.0 ～60.7 mm,秸秆覆盖还田处理的土壤贮水量增加特别明显。由此看出,长期秸秆还田可以增加土壤深层贮水、增加对上层土壤贮水的利用,减轻土壤深层干燥化问题。

2.2.3 对玉米水分利用效率的影响　秸秆还田长期定位试验的玉米水分利用效率的研究结果(表 10、表 11)表明,长期秸秆还田可以提高玉米水分利用效率。同秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理的玉米的水分利用效率 19 年累计平均提高 2.32 ～ 3.26 kg/(hm^2 · mm);各处理中玉米水分利用效率由高到低的顺序为秸秆养畜粪肥还田 > 秸秆覆盖还田 > 秸秆粉碎直接还田 > 秸秆不还田。玉米水分利用效率在偏旱年份较高,大旱年份最低。秸秆覆盖还田处理提高玉米水分利用效率的效果在偏旱年份最为明显。

3　讨论

秸秆还田对作物产量的影响效果,大家争论了许多年[8,11,13,17,19-22],其主要的问题在于缺乏长期的研究结果和不同秸秆还田方式效果的比较。本研究 19 年的结果表明,秸秆还田具有明显的增产增收效果,但不同的秸秆还田方式和不同降水年型对玉米产量和经济效益的影响存在明显差异。

中国北方干旱地区的土壤干燥化问题,一直受到关注[23-26]。秸秆还田可以减轻土壤干燥化程度,特别是秸秆覆盖还田,本试验开始后 3 m 土体间土壤贮水量比以前有所增加,并没有出现象王学春等[27-28]模拟预测的出现 1—3 m 土壤的干燥化情况,这可能和区域降水量较多及种植一年一作春玉米耗水量较低有关。

丰水年和偏丰年份的玉米产量和水分利用效率不是最高,可能原因是虽然降水量偏多,但由于玉米生长期间光热资源不足、降水分布不合理等问题,使玉米产量比“风调雨顺”的降水正常年份要偏低。因此,生产实践中在丰水年和偏丰年份应当注意保蓄降水、减少径流和休闲期无效耗散损失,增加土壤贮水。

4　结论

1) 秸秆还田增产增收效果十分明显。玉米籽粒产量 19 年累计增加 13.427 ～24.284 t/hm^2,增产

表10 长期秸秆还田对玉米水分利用效率的影响 [kg/(hm^2·mm)]

Table 10 Effects of different treatments on water use efficiency of rainfed corn in 1993–2011

处理 Treatment	年份 Year									
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
秸秆不还田 CK	13.71	14.76	7.09	15.48	11.46	14.68	6.41	9.02	20.61	14.93
秸秆覆盖还田 SM	13.90	16.36	10.13	16.14	11.91	19.78	9.13	11.67	23.11	13.54
秸秆粉碎直接还田 SC	16.71	15.73	9.68	16.11	11.66	15.63	9.12	12.66	20.66	14.17
秸秆养畜粪肥还田 CM	16.54	16.48	9.51	17.30	12.93	18.08	8.61	13.60	22.90	18.15

处理 Treatment	年份 Year								
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
秸秆不还田 CK	16.91	15.59	20.82	16.07	19.13	19.19	16.28	21.14	12.66
秸秆覆盖还田 SM	22.86	18.85	29.41	21.20	22.30	17.96	20.61	24.87	14.54
秸秆粉碎直接还田 SC	20.83	18.93	25.68	20.00	23.53	20.44	18.45	25.13	14.84
秸秆养畜粪肥还田 CM	22.22	22.67	25.31	19.54	24.37	21.55	17.91	24.26	15.89

注(Note): CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure.

表11 不同降水年型长期秸秆还田条件下的玉米平均水分利用效率[kg/(hm^2·mm)]

Table 11 Water use efficiency after 19 – year continuously straw returning to field in different precipitation years

处理 Treatment	丰水偏丰年 Rainy and wet year	平常年 Normal year	偏旱年 Dry year	大旱年 Extremely-dry year	19年均值 Mean of 19 years
秸秆不还田 CK	14.50	15.64	17.25	10.24	15.05
秸秆覆盖还田 SM	17.33	17.74	21.63	11.79	17.80
秸秆粉碎直接还田 SC	16.92	17.65	20.15	12.16	17.37
秸秆养畜粪肥还田 CM	18.01	18.88	20.27	13.27	18.31

注(Note): CK—No straw returning; SM—Straw mulching; SC—Straw crushing; CM—Cattle manure.

幅度达11.57%～20.92%。秸秆还田处理的玉米纯效益增加了12831～18171 Yuan/hm^2,增收率提高20.7%～29.4%。不同秸秆还田方式的玉米产量存在差异,其产量高低顺序为秸秆养畜粪肥还田>秸秆覆盖还田>秸秆粉碎直接还田>秸秆不还田;在不同的降水年型中以正常年份产量最高,偏旱年份秸秆覆盖还田的增产效果明显优于秸秆粉碎直接还田。

2)秸秆还田可以适度减少玉米生育期耗水量,19年平均玉米生育期耗水量由低到高的顺序为秸秆覆盖还田≦秸秆粉碎直接还田<秸秆养畜粪肥还田<秸秆不还田。各年度玉米生育期耗水量多少主要同玉米生育期降水量有关,一般表现为正常降水年份各处理玉米生育期耗水量较多,丰水和偏丰年份次之,偏旱年份再次之,大旱年份玉米耗水量最少。

3)1992年秋季到2011年10月试验期间,各处理3 m土体土壤贮水量均有所增加,但各处理间土壤贮水量及分布状况有明显差异,土壤贮水量的高低顺序为秸秆覆盖还田>秸秆粉碎直接还田>秸秆养畜粪肥还田>秸秆不还田;秸秆覆盖还田处理的土壤贮水量增加明显。因此秸秆还田可以增加土壤深层贮水、增加对上层土壤贮水的利用,减轻土壤深层干燥化问题。

4)同秸秆不还田相比,秸秆还田各处理玉米水分利用效率19年累计平均提高了2.32～3.26 kg/(hm^2·mm);各处理的大小顺序为秸秆养畜粪肥还田>秸秆覆盖还田>秸秆粉碎直接还田>秸秆不还田。各处理的玉米水分利用效率在偏旱年份较高,大旱年份最低。秸秆覆盖还田处理提高玉米水分利用效率的效果在偏旱年份最为明显。

参 考 文 献：

[1] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-438.
Yang W Z. Soil water resources and affore station in loess plateau [J]. J. Nat. Resour., 2001, 16(5): 433-438.

[2] 吴普特, 冯浩, 牛文全, 赵西宁. 中国节水农业战略思考与研发重点[J]. 科技导报, 2006, 24(5): 86-88.
Wu P T, Feng H, Niu W Q, Zhao X N. Research emphasis and reflection of strategy for water saving agriculture in China[J]. Sci. Technol. Rev., 2006, 24(5): 86-88.

[3] 韩思明. 黄土高原旱作农田降水资源高效利用的技术途径[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 1-9.
Han S M. Technical channels of high-efficient utilization of precipitation resource on dry-farming lands in Loess Plateau[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2002, 20(1): 1-9.

[4] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50-54.
Huang M B, Dang T H, Li Y S. Effect of advanced productivity in dryland farming of the Loess Plateau on soil water cycle[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2002, 18(6): 50-54.

[5] 毕于运, 王道龙, 高春雨, 等. 中国秸秆资源评价与利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
Bi Y Y, Wang D L, Gao C Y *et al*. Straw resources evaluation and utilization in China [M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2008.

[6] 陈新锋. 对中国农村焚烧秸秆污染及其治理的经济学分析[J]. 中国农村经济, 2001, (2): 47-52.
Chen X F. Economics analysis on pollution from straw burning and managing in rural China[J]. China Rur. Econ., 2001, (2): 47-52.

[7] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 62-67.
Zhong H P, Yue Y Z, Fan J W. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. Res. Sci., 2003, 25(4): 62-67.

[8] 刘天学, 纪秀娥. 焚烧秸秆对土壤有机质和微生物的影响研究[J]. 土壤, 2003, 35(4): 347-348.
Liu T X, Ji X E. Effects of crop straw burning on soil organic matter and soil microbes[J]. Soils, 2003, 35(4): 347-348.

[9] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估计[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 9-13.
Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C *et al*. Estimating the quantity of crop residues burnt in open field in China[J]. Resour. Sci., 2006, 28(1): 9-13.

[10] 何立明, 王立杰, 王桥, 等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析[J]. 中国环境监测, 2007, 23(1): 42-50.
He L M, Wang L J, Wang Q *et al*. Evaluation of the agricultural residues burning reduction in China using MODIS fire product [J]. Environ. Monit. China, 2007, 23(1): 42-50.

[11] 曾木祥, 张玉洁. 秸秆还田对农田生态环境的影响[J]. 农业环境与发展, 1997, (1): 1-8.
Zeng M X, Zhang Y J. Effects of returning straw into the field on farmland eco-environment[J]. Agro-Environ. Devel., 1997, (1): 1-8.

[12] 马忠明, 徐生明. 甘肃河西绿洲灌区玉米秸秆覆盖效应的研究[J]. 甘肃农业科技, 1998, (3): 14-16.
Ma Z M, Xu S M. Effects of straw mulching on irrigated maize in Gansu Corridor[J]. Gansu Agric. Sci. Technol., 1998, (3): 14-16.

[13] 张电学, 韩志卿, 刘微, 等. 不同促腐条件下玉米秸秆直接还田的生物学效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 742-749.
Zhang D X, Han Z Q, Liu W *et al*. Biological effect of maize stalk return to field directly under different accretion decay conditions[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(6): 742-749.

[14] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618-623.
Lao R X, Sun W H, Wang Z *et al*. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(4): 618-623.

[15] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19.
Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2005, 21(7): 15-19.

[16] 周怀平, 杨治平, 李红梅, 等. 秸秆还田和秋施肥对旱地玉米生长发育及水肥效应的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1231-1235.
Zhou H P, Yang Z P, Li H M *et al*. Effect of straw return to field and fertilization in autumn on dryland corn growth and on water and fertilizer efficiency[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(7): 1231-1235.

[17] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(2): 138-142.
Jia W, Zhou H P, Xie W Y *et al*. Effects of long-term returning corn stalks to the field combined with applying fertilizer in autumn on microbial biomass C, N and enzyme activity in Cinnamon soil [J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2008, 23(2): 138-142.

[18] 高亚军, 李生秀. 北方旱区农田水肥效应分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(7): 74-79.
Gao Y J, Li S X. Analysis of the effect of water and fertilizer on crop production in farmland of arid zone in Northern China[J]. Eng. Sci., 2002, 4(7): 74-79.

[19] 宋日, 吴春胜, 马丽艳, 等. 有机无机肥料配合施用对玉米根系的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(3): 393-396.
Song R, Wu C S, Ma L Y. Effect of application of combined fertilizers on the root system of maize[J]. Acta Agron. Sin., 2002, 28(3): 393-396.

[20] Ju X T, Gao Q, Christie P *et al*. Interception of residual nitrate from a calcareous alluvial soil profile on the North China Plain by deep-rooted crops: $A^{15}N$ tracer study[J]. Environ. Poll.,

2007, 146: 534-542.

[21] 王爱玲, 高旺盛, 洪春梅. 华北灌溉区秸秆焚烧与直接还田生态效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(1): 142-144.
Wang A L, Gao W S, Hong C M. Study on the ecological effect of crop residues burned or incorporated in field in North Central Irrigated Area of China[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2003, 11(1): 142-144.

[22] 闫丽珍, 成升魁, 闵庆文, 等. 作物秸秆资源的利用及其影响因素—以山西省夏县为例[J]. 资源开发与市场, 2005, 21(2): 126-127.
Yan L Z, Cheng S K, Min Q W *et al*. Utilizing the crop straws and its influencing factors—A case study of Xiaxian county in Shanxi province[J]. Resour. Devel. Market, 2005, 21(2): 126-127.

[23] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353-356.
Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland[J]. Acta Pedol. Sin., 2001, 38(3): 353-356.

[24] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 1-6.
Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in loess plateau[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(1): 1-6.

[25] 李军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱塬区高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 54-58.
Li J, Shao M A, Zhang X C *et al*. Simulation of soil desiccation and yield finctuation of high yield maize field on rain-fed highland of the Loess Plateau[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 15(2): 54-58.

[26] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 411-416.
Wang B, Liu W Z, Dang T H *et al*. Distribution features of soil water content in the profile of rainfed cropland with long-term fertilization[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(3): 411-416.

[27] 王学春, 李军, 胡伟, 等. 黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下连作春玉米产量与土壤干燥化效应模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 1-11.
Wang X C, Li J, Hu W *et al*. Simulation of yield and soil desiccation effects of continuous spring maize under different level fertilization treatments in Jinzhong semiarid areas of the Loess Plateau[J]. Agric. Res. Arid Areas, 2008, 26(1): 1-11.

[28] 王学春, 李军, 樊廷录. 黄土高原不同施肥水平下小麦玉米轮作的产量与土壤水分效应模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 242-251.
Wang X C, Li J, Fan T L. Modeling the effects of winter wheat and spring maize rotation under different fertilization treatments on yield and soil water in rain-fed highland of Loess Plateau[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(2): 242-251.