

秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响*

解文艳^{1,2} 樊贵盛¹ 周怀平^{2,3} 关春林² 杨振兴²

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 太原 030006;
3. 山西大学生物工程学院, 太原 030006)

【摘要】 基于中国北方干旱地区 18 年的长期秸秆还田田间定位试验,开展了不同秸秆还田方式及施肥时期对春玉米产量及水分利用效率影响的比较研究。结果表明:与春施肥对应处理相比,不同方式秸秆还田秋施肥具有显著增产效果,18 年累计增产玉米籽粒 9.71 ~ 15.58 t/hm²,增产率为 8.33% ~ 16.19%;同时,玉米生育期耗水量减少,土壤贮水量增加,水分利用效率明显提高。4 种不同秸秆还田方式对春玉米 18 年总产量、总水分利用效率的贡献从大到小依次为:秸秆过腹还田、秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆未还田。不同的降水年型,对各处理玉米产量和水分利用也存在较大影响。正常年型玉米产量最高,偏旱年型玉米水分利用效率最高。秸秆覆盖还田秋施肥对偏旱年份的增产及水分利用效率提高的效果尤为突出。

关键词: 春玉米 秸秆还田 水分利用效率 长期试验

中图分类号: S141.4; S152.7⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0060-08

Effect of Straw-incorporation on Corn Yield and Water Use Efficiency in Arid Farming Areas

Xie Wenyan^{1,2} Fan Guisheng¹ Zhou Huaiping^{2,3} Guan Chunlin² Yang Zhenxing²

(1. College of Environment Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
2. Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China
3. College of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract

Based on the results from 18-year long-term location experiment in dryland experimental area of northern China, the effects of various kinds of straw return to field such as no straw returning (CK), straw mulching (SM), straw crushing (SC), cattle manure (CM) and different fertilization time i. e. spring and autumn on corn yield and water use efficiency were studied. The results showed that the experiment of combining autumn fertilizing with returning stalks to field could increase the yield and water use efficiency of spring maize significantly compared to the spring fertilizing, meanwhile, it decreased the accumulated water consumption and increased the soil water storage amount. The results showed that autumn fertilizing increased 9.71 ~ 15.58 t/hm² in yield, compared with spring fertilizing. The range of increased in yield was 8.33% ~ 16.19%. The total corn yield and water use efficiency in the past 18-year decreased in the following order: CM > SM > SC > CK. In different rainfall years, the corn yield and water use efficiency were very different. In normal years, the corn yield was highest. In dry years, the water use efficiency of spring maize was highest and yield increasing effect from straw mulching combining with autumn fertilizing was striking.

Key words Spring maize, Straw return to field, Water use efficiency, Long-term fertilizer application

收稿日期: 2011-05-06 修回日期: 2011-07-12

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD29B05)、山西省科技攻关资助项目(2006031042)和农业部旱作节水农业重点开放实验室开放基金项目

作者简介: 解文艳,博士生,山西省农业科学院助理研究员,主要从事水土环境控制技术研究,E-mail: xwy6018060@163.com

通讯作者: 樊贵盛,教授,博士生导师,主要从事灌排理论与水土环境控制研究,E-mail: fanguis5507@263.net

引言

土壤水分作为作物产量的主要限制因子之一，对作物发育和产量具有很大影响。中国北方半湿润偏旱区农田土壤在黄土母质上形成，黄土具有较大的赋存土壤水和氮素的能力^[1-5]，为农作物生长所需水分和养分的调节提供了良好的物质基础，但同时在自然和人为活动的强烈作用下，水土流失严重，土地破碎化，土壤退化，作物产量低而不稳，有限的降雨及土壤水资源得不到高效利用^[6-7]。因此，采取适宜旱作农业技术显得尤为重要。

秸秆还田技术是改善农田生态环境、发展现代灌溉农业、旱作农业的重大措施，是节本增效型农业的重要技术支撑，也是促进绿色食品产业和农业可持续发展的有效手段^[8]。近年来关于秸秆还田的研究报道较多，研究焦点主要集中在单一还田方式对土壤物理性状、土壤养分和土壤酶活性的影响等方面，并取得了一些进展^[9-13]。关于同一地区同一生态系统下不同秸秆还田方式间的环境响应差异研究还不多，相应的技术体系也未形成。为此，于 1992~2010 年在中国北方半湿润偏旱区进行定位试验，通过设置秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆过腹还田等 3 种主要秸秆还田方式，研究长期秸秆还田条件下还田方式对土壤水分及作物生产力的影响，探索适宜当地生产和生态的最适秸秆还田方式，为该区作物生产及土壤扩蓄增容提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区地理位置及降水状况

试验田布设在山西省寿阳县宗艾村北坪黄土旱塬地上，地理坐标 N 37°58′22.0″~N 37°58′24.4″、E 113°06′37.8″~E 113°06′39.9″，海拔高度 1 130 m；多年平均气温 7.6℃，大于 10℃ 积温 3 400℃，无霜期为 135~140 d；年平均降水量 501.1 mm（年际间降水变率大），干燥度 1.3，属半湿润偏旱区。1993~2010 年试验期间年平均降水量 463.8 mm，70% 左右的降水集中在 6 月份~9 月份。

以生育年（玉米收获后的休闲期（上一年 10 月~当年 4 月）和生育期（当年 5 月~9 月））的降水量来划分不同降水年型：生育年降水量比多年平均值增减在 10% 以内为正常年；降水量减少 10%~30% 为偏旱年，降水量减少 30% 以上为大旱年；降水量增加 10% 以上为丰水年。在试验进行的 18 年中，正常年有 7 年（1993、1994、1996、1998、2004、2006、2008 年），偏旱年有 4 年（1999、2001、2005、

2010 年），大旱年有 2 年（1997、2000 年）；丰水年有 5 年（1995、2002、2003、2007、2009 年）。

1.2 田间试验设计

试验采用裂区设计，主区为春施肥（S）和秋施肥（A），副区为不同秸秆还田方式处理，共 8 个处理组合（表 1），各处理的氮肥和磷肥施肥量均为 150 kg/hm² 和 84 kg/hm²。在主区处理中春施肥是结合春播，穴施或浅条施化肥，施肥深度 4~7 cm，秋施肥是秋季结合深耕翻地，条施或全耕层深施肥，施肥深度 10~25 cm，化肥全部底施，生育期不再追肥。试验小区面积 54 m²，无重复，从 1992 年秋季开始实施，1993 年春季播种，到 2010 年已连续定位试验 18 年。

表 1 试验设计
Tab.1 Experimental design

主区处理	副区处理	试验内容
秋施肥	A1	秸秆未还田
	A2	秸秆覆盖还田，还田量 6 t/hm ²
	A3	秸秆粉碎直接还田，还田量 6 t/hm ²
	A4	秸秆过腹还田，腐熟湿牛粪还田量 45 t/hm ²
春施肥	S1	秸秆未还田
	S2	秸秆覆盖还田，还田量 6 t/hm ²
	S3	秸秆粉碎直接还田，还田量 6 t/hm ²
	S4	秸秆过腹还田，腐熟湿牛粪还田量 45 t/hm ²

1.3 材料方法

供试土壤为褐土性土，质地轻壤，土层深厚，地下水埋深在 10 m 以下，耕层土壤田间持水率为 25.3%。1992 年秋季试验前耕层土壤主要理化性状如下：土壤有机质含量 27.1 mg/kg、全氮含量 1.07 mg/kg、碱解氮含量 76.4 mg/kg、速效磷含量 2.80 mg/kg、速效钾含量 95 mg/kg。

供试用氮肥为进口尿素，含氮量 46%；磷肥为过磷酸钙（太原），含五氧化二磷 14%。玉米秸秆（风干）有机碳含量 38.1%~44.3%，全氮含量 7.39~9.79 g/kg，全磷含量 0.44~0.54 g/kg，全钾含量 17.1~27.5 g/kg。牛粪（风干），有机质含量 90.5~127.3 g/kg，全氮含量 3.93~4.97 g/kg、全磷含量 1.37~1.46 g/kg，全钾含量 14.1~34.3 g/kg。

供试玉米品种 1993~1995 年为烟单 14 号，1996~2002 年为晋单 34 号，2003~2009 年为强盛 31 号，密度 4.5~5.0 万株/hm²，行距 60 cm、株距 34~37 cm。播种时间一般在 4 月 15 日~4 月 28 日。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 玉米生物产量

每年玉米收获前，各处理取 10 株玉米地上部

分,按照玉米茎秆、叶片、苞叶、穗轴和籽粒部分,干燥后分别称量,计算生物产量。

每年玉米成熟收获前将各处理区一分为三(即每个处理划分为 3 个小区,每小区 18 m²),按小区收获玉米穗,称量后折算成各处理玉米籽粒产量。

1.4.2 土壤含水率

1993~2010 年于玉米播种前和收获后,测定各试验小区 3 m 深土体的土壤含水率,每 20 cm 为一层,土壤含水率用干燥法测定。

1.4.3 作物生育期耗水量

作物生育期耗水量 E 计算公式为

$$E = P + U - R - F - \Delta W \tag{1}$$

式中 P ——降水量,mm R ——径流量,mm
 U ——地下水补给量,mm
 F ——深层渗漏量,mm
 ΔW ——试验末期土壤贮水量与初期土壤贮水量之差,mm

晋东旱塬为黄土母质发育形成的褐壤土,疏松多孔,1 h 雨水入渗量可以达到 80 mm 左右,再加上试验地平整,地表径流小;地下水埋深在 10 m 以下,不易上移补给;在有作物生长的农田,多雨年份降水入渗深度不超过 2 m,所以 F 、 U 、 R 可忽略不计。因此式(1)可简化为

$$E = P - \Delta W \tag{2}$$

1.4.4 作物水分利用效率

计算公式为

$$W = Y/E \tag{3}$$

式中 W ——作物水分利用效率,kg/(mm·hm²)
 Y ——单位面积的作物产量,kg/hm²

2 结果与分析

2.1 长期秸秆还田秋施肥对玉米产量的影响

1993~2010 年长期秸秆还田各处理玉米产量结果见表 2、3。可以看出:

(1) 不同方式秸秆还田秋施肥增产效果明显。秸秆还田秋施肥 A2、A3、A4 处理,与春施肥处理 S1 比较,18 年累计增产玉米籽粒 26.91~36.62 t/hm²,增产率达 27.96%~38.05%;与秋施肥处理 A1 比较,18 年累计增产玉米籽粒 11.33~21.04 t/hm²,增产率达 10.13%~18.81%,同时增加了玉米秸秆 28.13~39.82 t/hm²,为秸秆还田提供了更为充裕的有机肥源。秋施肥与春施肥对应处理比较,18 年累计增产玉米籽粒 9.71~15.58 t/hm²,增产率为 8.33%~16.19%。这主要是因为秸秆还田秋施肥较好地解决了深施肥与春季保墒捉全苗的矛盾,以及秸秆腐解与幼苗争夺水分养分而影响玉米幼苗生

表 2 1993~2010 年秸秆还田试验玉米产量

Tab.2 Effect of deep fertilization and various kinds of straw return to field on yield in 1993~2010 t/hm ²																	
处	试验年份																
理	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
S1	5.74	7.37	4.69	6.48	2.50	5.38	1.64	2.79	4.48	5.66	4.78	6.15	5.70	5.09	7.84	8.23	4.39
S2	6.03	7.62	5.71	7.47	3.06	6.96	3.42	3.07	6.39	5.35	6.31	6.69	8.62	5.93	8.61	9.09	6.14
S3	6.26	6.92	4.78	7.68	3.34	5.57	2.52	3.53	4.91	5.57	6.06	7.60	7.30	7.43	9.54	11.34	5.46
S4	6.74	7.81	5.64	7.86	3.39	6.68	2.50	3.72	6.32	7.00	6.73	9.22	6.98	7.96	10.18	9.89	5.71
A1	6.32	7.60	5.45	7.68	3.68	6.43	2.45	2.93	6.12	6.69	5.05	6.82	6.95	5.70	8.84	9.29	5.94
A2	6.56	8.36	6.36	7.65	3.81	8.21	3.47	3.49	6.98	6.35	6.82	7.00	10.15	6.99	9.32	8.69	6.99
A3	7.02	8.04	6.12	7.88	3.80	6.72	3.31	4.19	5.99	6.32	6.64	7.47	8.34	6.68	9.69	9.56	6.31
A4	7.31	8.32	5.95	8.27	4.15	7.92	3.29	4.42	6.80	8.13	6.88	9.02	7.93	7.19	10.92	10.69	6.59

表 3 秸秆还田试验玉米产量结果分析

Tab.3 Analysis of corn yield with different treatments

处理	变异系数/%	18 年累计总产量	同习惯施肥处理相比		春秋施肥相应处理比较	
		/t·hm ⁻²	增产量/t·hm ⁻²	增产率/%	增产量/t·hm ⁻²	增产率/%
S1	32.92	96.25				
S2	28.06	115.03	18.78	19.51		
S3	33.60	113.45	17.20	17.87		
S4	29.97	122.65	26.40	27.43		
A1	28.92	111.83	15.58	16.19	15.58	16.19
A2	26.19	125.72	29.47	30.62	10.69	9.29
A3	25.86	123.16	26.91	27.96	9.71	8.56
A4	26.93	132.87	36.62	38.05	10.22	8.33

长的矛盾^[14]。

(2) 无论是春施肥还是秋施肥,不同方式秸秆还田各处理间玉米产量存在一定差异,其年平均产量由高到低依次为:秸秆过腹还田、秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆未还田。基本上反映出秸秆过腹还田秋施肥产量最高,增幅最大。这主要是由于在春施肥和秋施肥中,秸秆过腹还田均明显提高了土壤微生物生物量和土壤酶活性^[15],加速土壤矿质养分的分解利用和土壤有机质养分的分解,为玉米生长发育提供了充足的养分供应,最终使玉米的产量提高。

(3) 秸秆还田和秋施肥结合处理,进一步减小了玉米产量在年际间的波动。可以看出春施肥 S3 处理玉米产量波动最大(变异系数 33.60%),以秸秆粉碎直接还田秋施肥处理(A3)的玉米产量在年际间波动最小(变异系数 25.86%)。

2.2 不同降水年型秸秆还田秋施肥对玉米产量的影响

表 4 是不同降水年型秸秆还田秋施肥对作物平均产量的影响。由表 4 可以看出:

(1) 无论是春施肥还是秋施肥,不同方式秸秆

还田各处理在不同降水年型下玉米产量从高到低依次为:正常年型、丰水年型、偏早年型、大早年型。丰水年份的降水量虽然偏多,但降水多集中在 8 月份,在此期间光热资源供给受到一定影响,同时玉米根系活动层土壤养分存在随降水淋洗下移问题,导致水肥供应不协调,玉米产量比降水正常年份偏低。

(2) 干旱年型(偏早年型与大早年型)不同方式秸秆还田秋施肥增产作用更加明显,尤其是偏旱年份秸秆覆盖还田秋施肥(A2)处理。在干旱年型不同方式秸秆还田处理的产量水平比正常年型低,但是从不同方式秸秆还田增产率分析,干旱年型要高于正常年型。以偏早年型平均值看,秸秆还田秋施肥 A2、A3、A4 处理分别比春施肥 S1 处理增产了 51.98%、39.46%、41.49%;而正常年型平均值,秸秆还田秋施肥 A2、A3、A4 处理分别比春施肥 S1 处理增产 20.30%、20.09%、32.13%,明显低于偏旱年型的增产率。

(3) 不同方式秸秆还田各处理在不同年型下玉米单产的波动性从大到小依次为:偏早年型、丰水年型、正常年型、大早年型。

表 4 不同降水年型秸秆还田对作物平均产量的影响

处 理	大早年			偏早年			正常年			丰水年		
	产量	增产量	增产率	产量	增产量	增产率	产量	增产量	增产率	产量	增产量	增产率
	/t·hm ⁻²	/t·hm ⁻²	%	/t·hm ⁻²	/t·hm ⁻²	%	/t·hm ⁻²	/t·hm ⁻²	%	/t·hm ⁻²	/t·hm ⁻²	%
S1	2.65			4.79			6.35			5.47		
S2	3.07	0.42	15.88	6.75	1.96	40.87	7.11	0.76	12.04	6.42	0.95	17.40
S3	3.44	0.79	29.87	5.59	0.80	16.75	7.54	1.19	18.81	6.28	0.81	14.80
S4	3.56	0.91	34.40	6.03	1.24	25.89	8.02	1.67	26.37	7.05	1.58	28.87
A1	3.31	0.66	24.95	5.85	1.06	22.18	7.12	0.77	12.15	6.39	0.92	16.85
A2	3.65	1.01	38.00	7.28	2.49	51.98	7.64	1.29	20.30	7.17	1.70	30.99
A3	4.00	1.35	51.04	6.68	1.89	39.46	7.62	1.28	20.09	7.02	1.54	28.22
A4	4.29	1.64	62.00	6.78	1.99	41.49	8.39	2.04	32.13	7.69	2.22	40.61

2.3 不同降水年型秸秆还田秋施肥春季播种时耕层土壤含水率

春玉米苗期土壤水分充足是保证全苗、齐苗的关键,尤其是高产玉米,苗足、苗齐是高产的基础。寿阳试区春季干旱少雨、风大,春播时,耕层失水迅速,此时如果耕翻施肥,将加重耕层水分的散失,影响玉米种子的萌发和幼苗的生长;而秋季结合深耕翻施肥再加秸秆还田后精细耙耢,可起到秋保春墒的作用。春季若遇干旱,可直接耧播或机播,避免再一次翻动耕层土壤,有效保存了耕层土壤含水率,有利于抗旱出全苗^[16]。在土壤墒情评价的基础上,根据旱情评价指标,把旱情分为轻旱、中旱、重旱、极旱 4 个等级。

土壤含水率大于田间持水量 55%(土壤墒情为中旱)的条件下均可满足春玉米发芽和出苗^[17]。

图 1 是长期秸秆还田定位试验各处理不同降水年型下春季播种时耕层土壤含水率。由图 1 可以看出:

(1) 秸秆还田各处理耕层土壤水分,在春季湿润和正常年份,各秸秆还田处理间,耕层土壤水分状况差异不大;在春季干旱和特别干旱年份,秸秆覆盖还田处理的耕层土壤水分状况明显好于其他处理;秸秆直接还田处理,在春季需要采取镇压等措施,注意防止耕层土壤水分的散失。

秸秆直接还田的土壤水分效应明显低于秸秆覆盖还田,原因则在于这一方式尽管大幅度提高了土

壤有机物质含量,但在翻理过程中导致土壤毛细管断裂,使得耕层土壤处于较为疏松的状态,不利于土壤下层水分的上升,同时也使土壤失去了地面保护,在长达8个月的还田过程中,致使土壤侵蚀程度及土壤水散逸量均高于覆盖处理。

(2) 秋施肥各处理的耕层土壤水分,在春季湿润和正常年份,都能够满足玉米发芽和出苗需要;在

春季干旱年份,能基本满足玉米发芽和出苗需要;在春季特别干旱年份,除覆盖还田处理能基本满足需要外,其他处理无法满足,需要补灌。

(3) 春施肥各处理的耕层土壤水分,在春季湿润年份,能够满足玉米发芽和出苗需要;在正常年份,能基本满足玉米发芽和出苗需要;在春季干旱和特别干旱年份,各处理都无法满足需要,需要补灌。

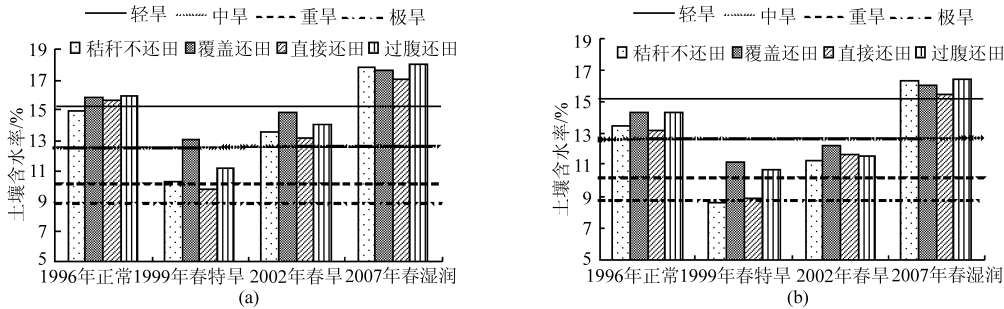


图1 长期秸秆还田定位试验各处理不同降水年型耕层土壤含水率

Fig.1 Soil moisture contents with different treatments in different precipitation year

(a) 秋施肥 (b) 春施肥

2.4 长期秸秆还田对玉米水分利用的影响

2.4.1 生育期耗水量

长期秸秆还田定位试验的玉米生育期耗水量结果(表5)显示,秋施肥处理的18年玉米生育期平均耗水量略低于春施肥处理,但差异不明显。与春施肥对应处理比较,秋施肥处理玉米生育期耗水量每年减少4.83~8.50 mm。长期秸秆还田各处理间玉米生育期耗水量也存在一定差异,春施肥与秋施肥18年玉米生育期平均耗水量由低到高的顺序依次为:秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆过腹还田、秸秆未还田。

玉米生育期耗水量主要与玉米生育期降水量相关(表5),一般表现为正常年型各处理玉米生育期耗水量最多,丰水年型次之,偏早年份再次之,大早年份玉米耗水量最少。

表5 不同降水年型下不同秸秆还田方式处理的玉米生育期耗水量

Tab.5 Water consumption of growth stages after 18-year continuously straw returning to field in different precipitation years					
处理	大旱年	偏旱年	正常年	丰水年	18 年均值
S1	314.00	359.09	448.21	461.24	417.11
S2	300.50	351.34	439.00	437.00	403.58
S3	311.50	357.51	428.36	445.68	404.44
S4	314.00	362.16	451.76	450.42	416.17
A1	323.00	346.41	455.19	440.34	412.20
A2	309.50	342.32	436.70	426.46	398.75
A3	328.50	334.73	435.21	430.06	399.60
A4	323.00	341.70	446.47	439.98	407.67

2.4.2 生育期贮水量

长期秸秆还田定位试验对收获期各处理3 m深土体土壤贮水量变化动态如图2、表6所示,可以看出:

(1) 春玉米连作18年后,无论是秋施肥还是春施肥,不同秸秆还田方式各处理土壤水分的垂直分布大致分为4个层次,其中200~300 cm土层土壤贮水量最高,各处理土壤贮水量基本稳定在250~270 mm;60~120 cm土壤贮水量最低,各处理之间的变化范围在106~119 mm;0~60 cm土壤贮水量居中。春玉米的土壤水分利用超过了200 cm土层,玉米根系的扎根深度一般在0~100 cm,仅有少量根系可下扎到200 cm,大于该深度的土壤水分是在水势梯度的作用下进入根系吸水层而被利用。在蒸腾拉力作用下,作物根系直接吸收0~200 cm土壤水分,使得该层土壤水分消耗剧烈,其中0~60 cm土层的土壤水分容易得到降水入渗的补给,60~120 cm土层消耗的大量土壤水分由于不能及时得到降水的补给而处在较低的水平;120~200 cm土层形成一个过渡层,200~300 cm土壤贮水量处于较高水平。

(2) 秸秆还田秋施肥 A2、A3 处理各土层土壤贮水量较 A1 处理均有增加,0~300 cm 土壤贮水总量增加明显,分别增加了 61.30 mm 和 39.28 mm。A4 处理与 A1 处理 3 m 深土体土壤贮水总量相近,但贮水分布有所不同;秸秆过腹还田处理(A4)0~100 cm土层土壤贮水量减少了 6.75 mm,而 100~300 cm土层土壤贮水量增加。

(3) 秸秆还田春施肥 S2 处理各土层土壤贮水

量较 S1 处理均有增加,0 ~ 300 cm 土壤贮水总量增加了 29.25 mm。S3 处理与 S1 处理 3 m 深土体土壤贮水总量相近;与 S1 处理相比,S3 处理 60 ~ 120 cm 土层土壤贮水量减少,其余土层土壤贮水量增加。S4 处理 3 m 深土体土壤贮水量总量略低于 S1 处理。

无论是秋施肥还是春施肥,秸秆覆盖还田处理可增强土壤的蓄水能力,其原因为:秸秆覆盖还田可增加土壤有机质含量,改善土壤结构,使土壤表层疏松,增加雨水入渗,抑制以土壤裸间蒸发为主的农田蒸散量。

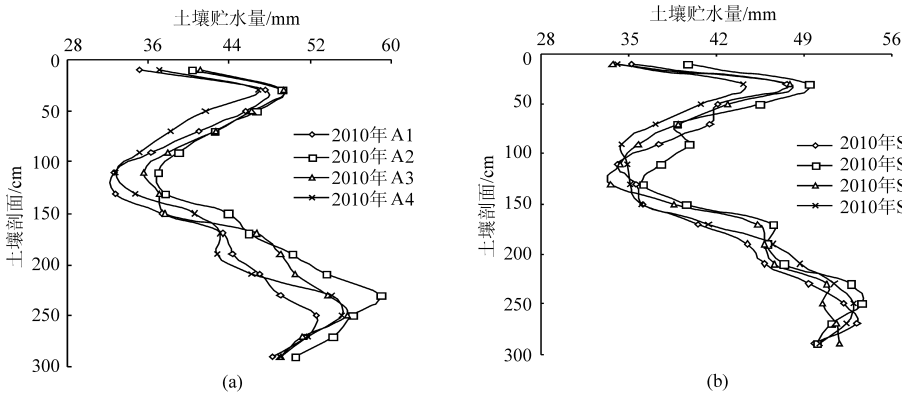


图 2 长期秸秆还田定位试验对收获期土壤贮水量分布的影响

Fig. 2 Effects of different treatment on soil water storage in 0 ~ 300 cm soil profiles during harvest period after 18 years
(a) 秋施肥 (b) 春施肥

表 6 2010 年收获期各处理不同土层贮水量

Tab. 6 Soil water storage of different treatments during harvest period of 2010								mm
土体层次/cm	A1	A2	A3	A4	S1	S2	S3	S4
0 ~ 60	128.20	136.21	136.75	125.48	125.03	134.68	124.58	119.00
60 ~ 120	109.92	118.41	116.29	106.01	113.15	116.38	109.05	106.58
120 ~ 200	157.87	177.67	170.44	161.21	156.71	168.43	163.45	159.08
200 ~ 300	248.53	273.54	260.32	256.13	250.27	254.93	251.44	255.85
0 ~ 300	644.53	705.83	683.81	648.84	645.16	674.41	648.51	640.51

2.4.3 水分利用效率

表 7、8 为长期秸秆还田定位试验的玉米水分利用效率,可以看出:

(1) 秸秆还田和秋季深施肥有机结合,可显著提高水分利用效率。与春施肥处理(S1)比较,18 年累计平均值提高 4.57 ~ 5.50 kg/(hm²·mm);与秋施肥处理(A1)比较,18 年累计平均值提高 2.24 ~

3.17 kg/(hm²·mm)。(2) 无论春施肥还是秋施肥,各处理中玉米水分利用效率由高到低依次为:秸秆过腹还田、秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆未还田。(3) 玉米水分利用效率,在偏早年份较高,大旱年份最低。秸秆覆盖还田秋施肥处理(A2)提高玉米水分利用效率的效果在偏早年份最为明显。

表 7 长期秸秆还田定位试验的历年玉米水分利用效率

Tab. 7 Effect of different treatments on water use efficiency of dryland corn in 1993 ~ 2010 kg/(hm²·mm)

处 理	年份																	
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
A1	13.71	14.76	8.68	15.48	11.46	14.68	6.41	9.02	20.61	14.93	16.91	15.59	20.83	16.07	19.12	19.19	16.28	21.15
A2	13.90	16.36	10.13	16.14	11.91	19.78	9.13	11.67	23.11	13.54	22.86	18.85	29.42	21.20	23.43	17.96	20.61	24.89
A3	16.71	15.73	9.68	16.11	11.66	15.63	9.12	12.66	20.66	14.17	20.83	18.93	25.69	19.99	23.54	20.44	18.46	25.14
A4	16.54	16.48	9.50	17.30	12.93	18.08	8.61	13.60	22.90	18.15	22.22	22.67	25.30	19.53	24.36	21.54	17.91	24.28
S1	12.51	14.12	7.35	13.22	7.96	12.81	4.33	8.89	13.18	12.25	13.52	13.98	15.94	14.42	16.38	18.14	11.74	20.40
S2	12.88	14.40	8.77	15.50	9.65	17.19	9.24	10.81	19.54	10.99	22.45	16.68	22.95	17.72	20.44	20.05	17.81	25.72
S3	14.56	13.31	7.37	15.90	10.60	14.62	7.10	11.46	15.39	12.21	19.88	19.02	19.04	22.23	21.51	25.16	14.56	20.51
S4	14.68	14.96	8.84	16.04	10.80	15.90	6.60	11.85	18.59	15.15	20.87	21.24	19.08	21.27	22.60	21.36	15.05	22.87

表 8 不同降水年型下不同秸秆还田处理的玉米水分利用效率

Tab.8 Water use efficiency after 18-year continuously straw returning to field in different precipitation years

						kg/(hm ² ·mm)					
处理	大旱年	偏旱年	正常年	丰水年	18 年均值	处理	大旱年	偏旱年	正常年	丰水年	18 年均值
A1	10.24	17.25	15.64	15.19	15.27	S1	9.32	13.46	14.17	12.25	12.84
A2	11.79	21.64	17.74	18.11	18.05	S2	9.35	19.36	16.35	16.09	16.27
A3	12.16	20.15	17.65	17.34	17.51	S3	11.03	15.51	17.83	15.11	15.80
A4	13.26	20.27	18.88	18.43	18.44	S4	11.32	16.78	17.92	16.50	16.54

3 结 论

(1)不同方式秸秆还田秋施肥增产效果十分明显。秋施肥与春施肥对应处理比较,18 年累计增产玉米籽粒 9.71 ~ 15.58 t/hm²,增产率为 8.33% ~ 16.19%。不同秸秆还田方式的玉米产量存在差异,其产量由高到低依次为:秸秆过腹还田、秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆未还田,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)秸秆还田秋施肥可以适度减少玉米生育期耗水量,18 年平均玉米生育期耗水量由低到高依次为:秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆过腹还田、秸秆未还田。玉米生育期耗水量主要

与玉米生育期降水量相关,一般表现为丰水和偏丰年份各处理玉米生育期耗水量较多,正常降水年份次之,偏旱年份再次之,大旱年份玉米耗水量最少。

(3)不同秸秆还田方式各处理间土壤贮水量及分布状况存在明显差异,秸秆覆盖还田处理可增强土壤的蓄水能力。

(4)同秸秆未还田相比,秸秆还田秋施肥各处理玉米水分利用效率 18 年累计平均值提高 2.24 ~ 3.17 kg/(hm²·mm);其由高到低依次为:秸秆过腹还田、秸秆覆盖还田、秸秆粉碎直接还田、秸秆未还田。各处理玉米水分利用效率,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 路文涛,贾志宽,高飞,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤水分及作物生产力的影响[J]. 农业环境科学学报,2011, 30(1):93 ~ 99.

Lu Wentao, Jia Zhikuan, Gao Fei, et al. Effects of straw returning on soil water and crop productivity in the rainfed area of southern Ningxia, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(1):93 ~ 99. (in Chinese)

2 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 Wenzhi. Soil water resources and afforestation in loess plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 433 ~ 438. (in Chinese)

3 吴普特,冯浩,牛文全,等. 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 Pute, Feng Hao, Niu Wenquan, et al. Research emphasis and reflection of strategy for water saving agriculture in China [J]. Science & Technology Review, 2006,24(5):86 ~ 88. (in Chinese)

4 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915 ~ 924.

Zhang Fusuo,Wang Jiqing,Zhang Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5):915 ~ 924. (in Chinese)

5 Castro Filho C, Henklain J C, Vieira M J, et al. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil [J]. Soil & Tillage Research, 1991, 20(2 ~ 4):271 ~ 283.

6 鲁向晖,高鹏,王飞,等. 宁夏南部山区秸秆覆盖对春玉米水分利用及产量的影响[J]. 土壤通报,2008,39(6):1 248 ~ 1 251.

Lu Xianghui, Gao Peng, Wang Fei, et al. Effect of straw mulch on yield and water utilization of spring maize in the south mountainous area of Ningxia [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008,39(6):1 248 ~ 1 251. (in Chinese)

7 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 Mingbin, Dang Yanhui, Li Yushan. Effect of advanced productivity in dryland farming of the loess plateau on soil water cycle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2002,18(6): 50 ~ 54. (in Chinese)

8 韩永俊,尹大庆,赵艳忠. 秸秆还田的研究现状[J]. 农机化研究,2003(2):39 ~ 40.

Han Yongjun, Yin Daqing, Zhao Yanzhong. The present situation of the researching of straw turnover [J]. Journal of

- Agricultural Mechanization Research, 2003(2):39~40. (in Chinese)
- 9 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5):539~542.
Wu Zhijie, Zhang Haijun, Xu Guangshan, et al. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5):539~542. (in Chinese)
- 10 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2):373~378.
Tian Shenzhong, Ning Tangyuan, Wang Yu, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2):373~378. (in Chinese)
- 11 Kapkiyai J J, Karanja N K, Qureshi J N, et al. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nifisol under long-term fertilizer and organic input management [J]. Soil Biol Biochem, 1999, 31(13):1 773~1 782.
- 12 刘建国, 卞新民, 李彦斌, 等. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5):1 027~1 032.
Liu Jianguo, Bian Xinmin, Li Yanbin, et al. Effects of long-term continuous cropping of cotton and returning cotton stalk into field on soil biological activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5):1 027~1 032. (in Chinese)
- 13 劳荣秀, 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 Rongxiu, Sun Weihong, Wang Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4):618~623. (in Chinese)
- 14 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):1 231~1 235.
Zhou Huaiping, Yang Zhiping, Li Hongmei, et al. Effect of straw return to field and fertilization in autumn on dryland corn growth and on water and fertilizer efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7):1 231~1 235. (in Chinese)
- 15 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 Wei, Zhou Huaiping, Xie Wenyan, 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 Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(2):138~142. (in Chinese)
- 16 杨治平, 周怀平, 李红梅. 旱农区秸秆还田秋施肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6):49~52.
Yang Zhiping, Zhou Huaiping, Li Hongmei. Effect of autumn fertilization combined with returning stalks to field on corn yield and water use efficiency in arid farming areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(6):49~52. (in Chinese)
- 17 赵先丽, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 辽宁春玉米出苗期水分胁迫试验初探[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4):35~39.
Zhao Xianli, Zhang Yushu, Ji Ruipeng, et al. Preliminary discussion on water stress of spring maize during seedling in Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(4):35~39. (in Chinese)

(上接第 88 页)

- 5 Sattar, Farook, Gao Xinting. Image enhancement based on a nonlinear multi-scale method using dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers, and Signal Processing-Proceedings, 2003: 716~719.
- 6 郑卫国, 颜永年, 卢清萍, 等. 基于 CT 图像的快速成形数据建模方法[J]. 中国机械工程, 2002, 13(20):1 734~1 737.
Zheng Weiguo, Yan Yongnian, Lu Qingping, et al. A modeling method for rapid prototyping based on CT images [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(20):1 734~1 737. (in Chinese)
- 7 张京平, 张华, 王会. 富士苹果主要成分的 CT 无损检测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7):99~102.
Zhang Jingping, Zhang Hua, Wang Hui. Non-destructive test of Fuji apple's major components by CT [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):99~102. (in Chinese)
- 8 Lee K H, Woo H, Suk T. Data reduction methods for reverse engineering [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(10):735~740.