

秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响*

余坤¹ 冯浩^{1,2} 李正鹏¹ 王增丽³

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 武威市水利技术综合服务中心, 武威 733000)

摘要: 通过2年田间试验,对比研究了秸秆经粉碎、氨化处理后施入土壤对农田0~100 cm土壤水分动态、冬小麦耗水特征、水分利用效率(W_{UE})及降雨利用效率(P_{UE})的影响。结果表明,连续2年冬小麦生育期0~100 cm土壤贮水量变化趋势基本一致;氨化秸秆连续2年还田能显著提高成熟期0~100 cm土壤贮水量,较秸秆覆盖分别提高4.95%和1.82% ($P < 0.05$),较未氨化秸秆还田分别提高4.24%和1.75% ($P < 0.05$)。此外,秸秆覆盖较秸秆翻压还田措施能有效降低冬小麦生育期内总耗水量;氨化秸秆施入土壤后较未氨化秸秆能显著降低冬小麦总耗水量,作用效果主要体现在冬小麦生长后期。粉碎并氨化秸秆连续2年还田能显著提高冬小麦籽粒产量,较秸秆覆盖还田分别提高9.07%和11.42% ($P < 0.05$),并显著提高冬小麦 W_{UE} 和 P_{UE} 。

关键词: 粉碎 氨化 秸秆 土壤贮水量 冬小麦 耗水特征

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0116-08

引言

旱地农业生产中,土壤水分作为作物产量的主要限制因子之一,对作物的发育及产量形成具有重要影响^[1]。培肥地力、纳雨蓄墒、减少土壤水分无效蒸发,提高土壤保水和供水能力,可提高作物产量,进而提高作物水分利用效率是旱作农业研究的重要任务,这对改善我国农业生态环境具有十分重要的意义^[2-3]。

目前,秸秆还田已经成为改良土壤结构、提高土壤贮水和供水能力的重要手段之一。研究表明,农田进行秸秆覆盖措施能有效改良土壤结构,降低土壤无效蒸发^[4],且在一定范围内随秸秆覆盖量的增加,抑制蒸发效果增强^[5],使作物产量和水分利用效率得以提高^[6-7]。但也有研究表明,秸秆覆盖后产生的低温效应推迟作物的生育期,秸秆覆盖量越大,低温效应越明显^[8-10]。因此,秸秆覆盖还田对土壤水分及作物产量的促进作用具有一定的尺度范围^[11]。有研究表明,秸秆粉碎后施入土壤,较长的秸秆能迅速改良土壤结构,改善作物生长环境,进而提高作物产量^[12-14];同时低碳氮比值的秸秆(如苜蓿秆)较常规作物秸秆更能显著地改善土壤结构,提高土壤的含水量^[15-16]。

秸秆氨化处理一般用于秸秆类饲料的加工贮藏。利用液氨、尿素、碳氨作为氨源,调节还田作物秸秆的碳氮比值,促进秸秆木质素彻底变性,使秸秆的酸性洗涤纤维、半纤维素和木质素含量下降,同时提高粗蛋白含量^[17],破坏角质层外层的酯类化合物。研究表明,氨化秸秆施入土壤后,能有效加快秸秆的分解速率,改善土壤结构^[18]。

本研究通过对秸秆进行粉碎、氨化处理后施入土壤,以增加土壤中秸秆分布的均匀性并降低秸秆的碳氮比值。通过田间试验,对比研究秸秆不同预处理方式对土壤水分分布、冬小麦耗水特征以及水分利用效率的影响,为充分发挥秸秆改土保墒,提高作物产量、水分利用效率和降水利用效率的作用,及提升农田综合效应提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2011年10月—2013年6月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院试验站进行。该站位于E 108°24', N 34°20', 海拔高度521 m,地理位置属暖温带季风半湿润气候区。土壤质地为中壤土,0~1 m土层平均田间持水率23%~25%,凋萎

收稿日期: 2014-05-12 修回日期: 2014-06-14

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102904)和高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B12007)

作者简介: 余坤, 博士生, 主要从事农业水土资源利用与保护研究, E-mail: yukun88@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 冯浩, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

含水率为 8.5%, 平均干容密度为 1.44 g/cm^3 。

1.2 秸秆预处理及试验设计

试验前将麦秸粉碎至粉末状 (1 mm) 和长秸秆 (50 mm) 2 个水平, 粉末状秸秆过 1 mm 筛备用。秸秆氮化处理参考毛华明等^[17]的方法, 以水溶液形式向秸秆中加入占其干质量 1.33% 的氮素 (调整秸秆碳氮比值为 25/1) 和 4% 的氢氧化钙, 溶液总质量为秸秆干质量的 30%, 以喷洒方式与秸秆混合均匀后装入密闭塑料箱放入人工气候箱, 在 35°C 恒温下培养 6 d 备用。

试验共设 4 个处理, 分别为秸秆覆盖 (CK), 秸秆翻压还田 (T1), 秸秆氮化翻压还田 (T2) 和秸秆粉碎氮化翻压还田 (T3)。各处理重复 3 次, 采用随机区组排列, 小区面积为 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$), 试验区周围布置 2 m 宽的相同作物保护带。供试冬小麦品种为小偃 22 号, 播种量为 187.4 kg/hm^2 , 行距为 25 cm, 分别于 2011 年 10 月 19 日和 2012 年 10 月 15 日种植, 于 2012 年 6 月 5 日和 2013 年 6 月 3 日收获, 全生育期平均 236 d。秸秆还田量均为 4500 kg/hm^2 , 硫酸钙施入量为 2500 kg/hm^2 ; 基肥施用量尿素为 (N 质量分数 46%) 225 kg/hm^2 、磷酸二铵为 (P_2O_5 质量分数 48%) 112.5 kg/hm^2 。基肥与预处理秸秆在播种前通过旋耕机一次性翻入 0~15 cm 耕层土壤内, 生育期内不追肥。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

测定数值为质量含水率。试验期间每隔 15 d 采用土钻取土干燥法测定一次, 测定深度为 1 m。表层 0~40 cm, 每隔 10 cm 测定一次, 40~100 cm 土层每隔 20 cm 测定一次, 土层共 7 个层次。播种前和收获后测定深度为 2 m。

1.3.2 作物耗水量

冬小麦耗水量采用水量平衡法计算, 公式为

$$E_T = \Delta W + P + I + K - R \quad (1)$$

式中 E_T ——阶段耗水量, mm

P ——生育期降水量, mm

I ——生育期灌溉量, mm

ΔW ——相邻两次取样 0~100 cm 土层储水量变化, mm

K ——时段内地下水的补给量, mm

R ——时段内地表径流量, mm

由于试验地在冬小麦全生育期内次降雨量较小, 且试验小区地势平坦, 地下水埋深 5 m 以下, 可忽略径流和地下水补给。

1.3.3 作物水分利用效率

作物收获时按小区计算产量, 根据冬小麦产量

和生育期耗水量计算水分利用效率和降水利用效率。

$$W_{UE} = G_Y/E_T \quad (2)$$

$$P_{UE} = G_Y/P \quad (3)$$

式中 W_{UE} ——水分利用效率, kg/m^3

P_{UE} ——降水利用效率, kg/m^3

G_Y ——冬小麦经济产量, kg/hm^2

气象资料: 由西北农林科技大学灌溉试验站提供。

1.4 数据处理

试验采用 SPSS15.0 对数据进行单因素方差分析, 采用 Duncan 新复极差法进行显著性检验 ($P < 0.05$), Excel 2003 制图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分 (0~100 cm) 的时空变化

2.1.1 土壤贮水量的时间变化特征

作物对土壤水分的利用状况取决于不同土层中的根系分布, 根系的吸水速率及土壤有效水含量。其中土壤水分的吸收和消耗与根系分布有着密切关系^[19]。本试验中 2 年冬小麦生长后期 (开花期以后) 降雨量均较多 (第 1、2 试验年度分别为 79.1、180 mm), 而在冬小麦生长后期根系土壤水分含量较高的情况下, 冬小麦主要消耗表层 0~80 cm 土层的水分, 对深层土壤水分利用较少^[20]。故本文重点探讨不同预处理秸秆还田对 0~100 cm 土层土壤贮水量及水分分布的影响。

由图 1 可以看出, 连续 2 年秸秆预处理还田, 冬小麦生育期内降雨量和土壤贮水量均呈 V 字形变化, 在分蘖期和成熟期较高, 而在开花期较低。这与冬小麦的生长发育特点及研究区的降水条件相关。在 2011—2012 年冬小麦生育期内, 冬小麦分蘖期, T2、T3 处理 0~100 cm 土壤贮水量显著低于 CK、T1, 这可能是由于氮化措施促进了秸秆的分解, 分解过程消耗较多的水分^[18], 导致土壤贮水量较低。拔节期各处理 0~100 cm 土壤贮水量无显著性差异, 这可能与该时期取样前对各小区进行了等量灌溉有关。拔节期以后, 作物生长速率加快, 作物蒸腾消耗水分较多。在开花期, T1 处理 0~100 cm 土壤贮水量最高, T2 最低, 二者间差异显著。其原因可能是 T2 处理冬小麦生长较旺盛, 蒸腾消耗的水分较多。成熟期由于降水量较多, 土壤贮水量增加。T2 处理 0~100 cm 土壤贮水量最高, 分别较 CK 和 T1 处理增加 4.95% 和 4.24% ($P < 0.05$), T2 与 T3 处理间差异不显著。说明氮化秸秆还田在作物生长后期能显著提高 0~100 cm 土壤贮水量, 且长度为

1 mm和50 mm的氮化秸秆在改善0~100 cm土壤贮水量上效果基本一致。在2012—2013年冬小麦生育期间,各处理在不同生育期0~100 cm土壤贮水量变化特

征与2011—2012年生长季基本一致,成熟期T2处理0~100 cm土壤贮水量分别较CK和T1提高1.82%和1.75% ($P < 0.05$),T2与T3处理差异不显著。

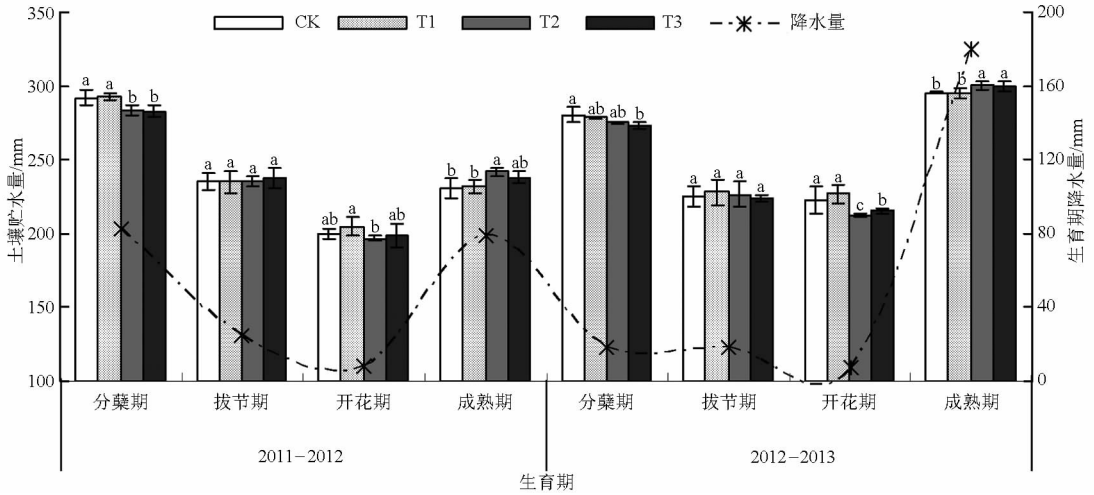


图1 2011—2013年各处理冬小麦不同生育期0~100 cm土层土壤贮水量变化动态

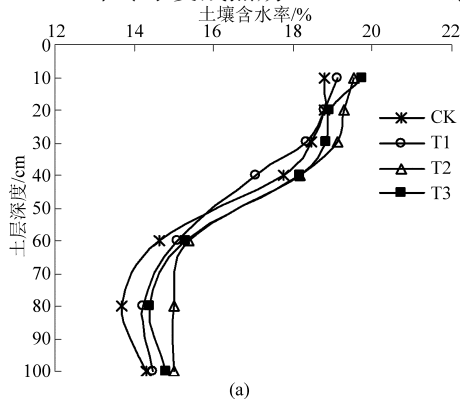
Fig. 1 Soil water storage of 0~100 cm at different growth stage of winter wheat under different treatments in 2011—2013

2年试验结果表明:在分蘖和开花期,T1处理0~100 cm土壤贮水量较高;拔节期,各处理0~100 cm土壤贮水量无显著性差异;成熟期,T2和T3处理0~100 cm土壤贮水量显著高于CK和T1。说明氮化秸秆还田措施提高土壤贮水量的效果主要体现在作物生长后期,可保证作物生长后期干物质的积累及转化。这可能是由于秸秆氮化后施入土壤较未氮化秸秆能显著降低土壤容重,提高土壤的持水能力^[21],进而提高0~100 cm土壤贮水量。

2.1.2 土壤含水率的空间变化特征

开花期后,冬小麦生殖生长速率加快,干物质的积累及光合产物向籽粒的转化消耗水分较多,但较多的降雨量,使成熟期土壤贮水量增加(图1),到成熟期时不同处理农田土壤含水率变化趋势基本一致(图2)。

2011—2012年冬小麦成熟期0~100 cm土壤含



水率随深度的增加呈先降后升的趋势(图2a)。统计分析表明,0~20 cm土层平均土壤含水率表现为T2和T3处理较CK分别提高3.36%和2.94% ($P < 0.05$),较T1分别提高2.39%和1.94% ($P < 0.05$)。30~40 cm土层各处理土壤含水率逐渐下降,其中,T2和T3处理土壤含水率分别较T1提高5.39%和4.59% ($P < 0.05$),与CK处理差异不显著。60~100 cm土层土壤含水率表现为T2处理较CK提高6.39% ($P < 0.05$),T1和T3处理与CK差异不显著。2012—2013年冬小麦成熟期0~100 cm土层土壤含水率随深度的增加呈先升后降的趋势(图2b)。统计分析表明,0~40 cm土层各处理土壤含水率差异不显著,这可能与该时期降雨量较多有关。30~40 cm各处理土壤含水率变化均较为缓和,其中T2和T3处理土壤含水率较CK分别提高2.37%和3.35% ($P < 0.05$),较T1分别提高

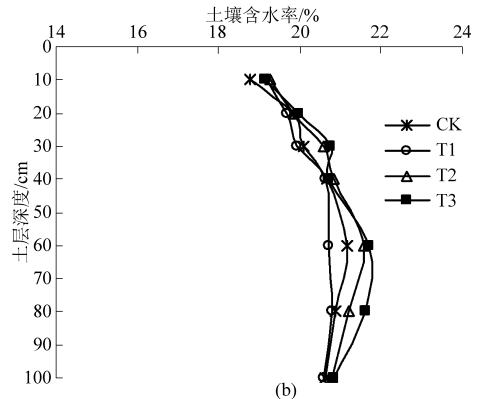


图2 2011—2013年不同处理冬小麦成熟期0~100 cm土层土壤含水率变化动态

Fig. 2 Soil moisture distribution in 0~100 cm soil profile under different treatments in winter wheat maturity stage of 2011—2013

(a) 2011—2012年生长季 (b) 2012—2013年生长季

1.43% 和 2.40% ($P < 0.05$)。

2.2 冬小麦耗水特征分析

2.2.1 麦田耗水水分来源及田间耗水百分比

由表 1 可知,连续两年试验 CK 处理田间耗水量均显著低于其他处理,但灌水量和降水量占总耗水量的百分比均显著高于其他处理。说明秸秆覆盖还田措施较秸秆翻压还田措施更能有效降低冬小麦生育期内的总耗水量,使灌水和降水充分发挥作用。这可能是因为冬小麦拔节期之前,降水较少,蒸发较强,秸秆覆盖阻碍了土壤水分向大气逸散的通道,减少了土壤水分的无效消耗^[22]。连续 2 年试验 T2 和 T3 处理总耗水量分别较 T1 处理降低 1.73%、

1.05% ($P < 0.05$) 和 1.07%、1.54% ($P < 0.05$),且 T2 和 T3 处理灌水量与降水量占总耗水量的百分比显著高于 T1,说明氮化秸秆施入土壤后较未氮化秸秆能显著降低冬小麦总耗水量,促进冬小麦对灌水和降水的利用。T2 与 T3 处理总耗水量差异不显著,说明秸秆粉碎程度与氮化秸秆还田混合措施对冬小麦总耗水量的交互作用不明显。连续 2 年试验中,土壤贮水消耗量占总耗水量的百分比均较小,且 2012—2013 年各处理(T1 除外)土壤贮水消耗量为负,这是由于在整个生育期内灌水和降水量可以满足冬小麦的耗水需求使多余的水分在土壤中贮存导致。

表 1 不同处理对冬小麦耗水量及耗水来源比例的影响

Tab.1 Effects of different treatments on the ratios of different water resource of water consumption

年份	处理	总耗水量 /mm	灌水量 /mm	灌水量/总耗水量 /%	降水量 /mm	降水量/总耗水量 /%	土壤贮水 消耗量/mm	土壤贮水消耗量/ 总耗水量/%
2011—2012	CK	378.2 ^c	180	47.5 ^a	192.3	50.8 ^a	6.4 ^c	1.7 ^c
	T1	392.4 ^a	180	45.9 ^c	192.3	49.1 ^c	19.8 ^a	5.0 ^a
	T2	385.6 ^b	180	46.7 ^b	192.3	49.9 ^b	13.3 ^b	3.4 ^b
	T3	388.2 ^{ab}	180	46.5 ^{bc}	192.3	49.6 ^{bc}	15.1 ^{ab}	3.9 ^{ab}
2012—2013	CK	334.4 ^c	120	35.8 ^a	223.7	66.8 ^a	-8.9	-2.7
	T1	343.9 ^a	120	34.8 ^c	223.7	64.9 ^c	2.9	0.3
	T2	340.3 ^b	120	35.2 ^b	223.7	65.7 ^b	-3.4	-0.9
	T3	338.7 ^b	120	35.4 ^b	223.7	65.9 ^b	-3.9	-1.3

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2.2 冬小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度

各处理冬小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度如表 2 所示。由表 2 可知,2 年试验中,冬前至

拔节期耗水量均为最高,这可能是由于冬前至拔节期阶段历时最长,地表冠层覆盖率较低,土壤无效蒸发较强所致。

表 2 不同处理对冬小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度的影响

Tab.2 Effects of different treatments on water consumption rate, water consumption percentage and water consumption per day

年份	处理	播种至冬前			冬前至拔节			拔节至开花			开花至成熟		
		E_{Ta} /mm	C_p /%	C_D /(mm·d ⁻¹)	E_{Ta} /mm	C_p /%	C_D /(mm·d ⁻¹)	E_{Ta} /mm	C_p /%	C_D /(mm·d ⁻¹)	E_{Ta} /mm	C_p /%	C_D /(mm·d ⁻¹)
2011—2012	CK	33.6 ^b	8.9 ^b	0.46 ^b	165.5 ^{ab}	43.8 ^a	1.7 ^a	44.9 ^b	12.2 ^a	2.8 ^a	134.1 ^b	35.1 ^{ab}	3.0 ^b
	T1	35.5 ^b	8.9 ^b	0.48 ^b	170.6 ^a	43.0 ^{ab}	1.7 ^a	43.3 ^b	10.8 ^b	2.6 ^b	143.1 ^a	37.3 ^a	3.3 ^a
	T2	43.7 ^a	12.0 ^a	0.63 ^a	162.7 ^b	42.4 ^b	1.6 ^b	47.9 ^a	12.1 ^a	2.9 ^a	131.3 ^b	33.4 ^b	2.9 ^b
	T3	47.6 ^a	12.4 ^a	0.66 ^a	166.5 ^{ab}	42.7 ^{ab}	1.7 ^a	43.7 ^b	11.2 ^b	2.7 ^b	131.3 ^b	34.0 ^b	3.0 ^b
2012—2013	CK	31.7 ^b	9.5 ^b	0.42 ^b	128.9 ^a	38.5 ^a	1.3 ^a	70.7 ^{ab}	21.1 ^{ab}	3.7 ^{ab}	102.8 ^b	32.0 ^a	2.6 ^a
	T1	32.9 ^b	9.5 ^b	0.43 ^b	130.1 ^a	37.5 ^a	1.4 ^a	68.6 ^b	19.8 ^b	3.6 ^b	111.6 ^a	32.2 ^a	2.7 ^a
	T2	40.9 ^a	11.9 ^a	0.52 ^a	128.5 ^a	37.4 ^a	1.4 ^a	78.8 ^a	23.0 ^a	4.1 ^a	92.1 ^c	26.8 ^b	2.2 ^b
	T3	39.5 ^a	11.6 ^a	0.54 ^a	128.4 ^a	37.8 ^a	1.4 ^a	73.5 ^{ab}	21.6 ^{ab}	3.9 ^{ab}	96.4 ^{bc}	28.6 ^b	2.3 ^b

注: E_{Ta} 耗水量(Actual crop evapotranspiration); C_p 耗水模系数(Water consumption percentage); C_D 耗水强度(Water consumption per day)。

2011—2012 生长季,播种至冬前期,T2 和 T3 处理阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度均显著高于 T1 处理,这可能与氮化秸秆分解速率较快,分解过程中消耗水分较多有关^[18]。冬前至拔节期,T1 处

理阶段耗水量最高,与其他处理差异显著。拔节至开花期,T2 处理阶段耗水量最高,分别较 CK 和 T1 处理高 6.68% 和 10.62% ($P < 0.05$)。开花至成熟期,T2 和 T3 处理阶段耗水量、耗水模系数和耗水强

度均显著低于 T1 处理,表明氮化秸秆还田措施较未氮化秸秆措施更能显著降低冬小麦生长后期的水分消耗。原因可能是氮化秸秆施入土壤后改善了土壤结构和土壤孔隙分布的均匀性,在提高土壤持水能力的同时,抑制了水分的土壤无效蒸发^[23],进而降低了冬小麦阶段耗水量。

2012—2013 生长季冬小麦耗水强度为拔节至开花期最大,播种至冬前期最小;各处理冬小麦阶段耗水量、耗水模系数和耗水强度变化规律与 2011—2012 生长季基本一致。

2.2.3 冬小麦产量及其构成因素

由表 3 可以看出,各处理冬小麦穗粒数较 CK 均呈增加的趋势,T2 和 T3 与 CK 处理差异显著。单位面积有效穗数结果表明,秸秆氮化措施能显著增加有效穗数。其中,T2 和 T3 处理有效穗数在第 1 个生长季分别较 CK 增加 19.26% 和 18.16% ($P < 0.05$),第 2 个生长季分别增加 23.52% 和 20.65% ($P < 0.05$),说明氮化秸秆能显著增加冬小麦的分

蘖数,提高单位面积内的有效穗数。冬小麦千粒重的测定结果表明,有效穗数的增加致使单个籽粒分配的营养物质减少,进而干物质质量减少。因此,CK 处理千粒重较 T2 和 T3 处理大,且处理间差异显著。T2 和 T3 处理冬小麦籽粒产量在第 1 个生长季分别较 CK 提高 9.58% 和 9.07% ($P < 0.05$);在第 2 个生长季 T3 处理冬小麦籽粒产量最高,分别较 CK 和 T1 处理增加 11.42% 和 10.23% ($P < 0.05$)。这可能是由于氮化秸秆在提高土壤持水能力的同时,改善了土壤结构和微生物环境,使得土壤中微生物数量增加,土壤酶活性增强,从而加快土壤矿质养分和土壤有机质的分解,保证了冬小麦生长过程中所需养分的供应,使作物籽粒产量增加。2 个生长季 CK 处理地上生物量均为最低,与其他处理差异显著。表明秸秆翻压还田较秸秆覆盖措施能有效增加地上生物量,氮化后效果更加显著;CK 与 T3 处理收获指数最高,与其他处理差异显著。

表 3 不同处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

Tab. 3 Effects of different straw utilization treatments on yield and its components of wheat

年份	处理	穗粒数 /(粒·穗 ⁻¹)	单位面积有效穗数 /(穗·m ⁻²)	千粒 质量/g	籽粒产量 /(kg·hm ⁻²)	地上生物量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数
2011—2012	CK	37.9 ^b	815 ^b	48.47 ^a	8 276 ^b	18 855 ^b	0.439 ^a
	T1	38.9 ^b	821 ^b	47.74 ^{ab}	8 563 ^b	21 143 ^a	0.405 ^b
	T2	40.9 ^a	972 ^a	46.24 ^b	9 068 ^a	22 174 ^a	0.409 ^b
	T3	39.7 ^a	963 ^a	46.68 ^b	9 026 ^a	20 704 ^a	0.436 ^a
2012—2013	CK	37.3 ^b	799 ^b	49.06 ^a	7 425 ^b	16 638 ^b	0.446 ^a
	T1	38.8 ^{ab}	893 ^{ab}	48.98 ^{ab}	7 505 ^b	17 408 ^{ab}	0.421 ^b
	T2	40.8 ^a	987 ^a	47.75 ^b	7 652 ^{ab}	17 731 ^a	0.431 ^b
	T3	39.6 ^a	964 ^a	48.30 ^b	8 273 ^a	18 312 ^a	0.453 ^a

注:穗粒数、单位面积有效穗数、千粒质量和地上生物量与籽粒产量的相关系数分别为 0.30、0.76、-0.89 和 0.88。

相关性分析结果表明,籽粒产量和有效穗数的相关性最大,相关系数达 0.76,说明提高有效穗数是增产的主要途径。氮化并粉碎秸秆还田措施能有效增加冬小麦有效穗数和地上生物量,进而提高冬小麦籽粒产量,是本试验中最优的秸秆还田方式。

2.2.4 水分利用效率及降水利用效率

产量水平的 W_{UE} 是衡量节水措施的一项重要指标,而 P_{UE} 则能反映旱地农业中降水的生产潜力。不同处理连续 2 年试验,冬小麦 W_{UE} 和 P_{UE} 如图 3 所示。由图 3 可知,T2 和 T3 处理 W_{UE} 在第 1 个生长季分别较 CK 提高 8.17% 和 9.05% ($P < 0.05$),较 T1 提高 9.95% 和 10.84% ($P < 0.05$)。在第 2 个生长季,T3 处理冬小麦 W_{UE} 最高,分别较 CK 和 T1 处理提高 12.08% 和 14.04% ($P < 0.05$)。由此可知,调整碳氮比值后的秸秆施入土壤较覆盖措施更能有效

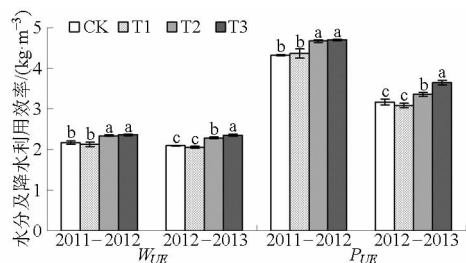


图 3 连续 2 年不同处理作物 W_{UE} 与 P_{UE}

Fig. 3 Water use efficiency and precipitation use efficiency of different straw utilization treatments

提高冬小麦 W_{UE} , 粉碎后效果更加显著。分析原因可能是氮化秸秆在提高土壤持水能力、减少土壤水分无效消耗的同时,促进了作物的生长,提高了作物产量,进而提高了 W_{UE} 。

由 P_{UE} 分析结果可知,T2 和 T3 处理 P_{UE} 在第 1 个生长季较 CK 分别提高 8.08% 和 8.75% ($P <$

0.05); 在第 2 个生长季较 CK 分别提高 5.96% 和 15.01% ($P < 0.05$)。此外, 统计分析结果表明处理的 W_{UE} 和 P_{UE} 在第 1 个生长季无显著性差异, 而在第 2 个生长季差异显著, 说明粉碎氮化秸秆还田措施对提高作物 W_{UE} 和 P_{UE} 具有一定的迟效性。试验结果表明, 氮化并粉碎秸秆还田措施在提高冬小麦 W_{UE} 和 P_{UE} 方面具有一定的促进作用。

3 讨论

在半干旱地区, 作物增产主要依赖于生育期间的有效降水和播种前的土壤蓄水^[24-25], 秸秆还田措施对土壤水分的影响较大, 其影响程度与作物生育期的降水量及分配关系密切。有研究表明, 在夏玉米—冬小麦的轮作体系中, 秸秆还田措施有利于提高土壤水库的保墒能力, 降低农田蒸散量, 提高降水利用率^[16]。粉碎秸秆还田措施具有较高的节水效果^[26]。秸秆经粉碎、氮化处理后施入土壤能有效提高土壤持水能力, 有利于土壤有效水的保存, 提高土壤抗旱能力^[22]。对农田采用保护性耕作措施, 特别是在干旱年份, 有利于将降雨贮存于深层土壤, 以供下季作物生长需要^[27]。本试验研究表明氮化秸秆

施入土壤能有效提高 0 ~ 100 cm 土层的土壤贮水量, 降低冬小麦生育期总耗水量, 提高冬小麦籽粒产量及水分利用效率, 这与王增丽等^[28] 研究结果一致。

4 结论

(1) T2 处理成熟期 0 ~ 100 cm 土壤贮水量最高, 分别较 CK 和 T1 处理增加 4.95% 和 4.24% ($P < 0.05$), T2 与 T3 处理间土壤贮水量的差异不显著。氮化秸秆还田措施在作物生长后期能显著提高 0 ~ 100 cm 土层的土壤贮水量, 且长度小于 50 mm 的氮化秸秆改善 0 ~ 100 cm 土壤贮水量效果基本一致。

(2) 秸秆覆盖较秸秆翻压还田措施更能有效降低冬小麦生育期内总耗水量。氮化秸秆施入土壤后较未氮化秸秆更能显著降低冬小麦总耗水量, 且作用效果主要体现在冬小麦生长后期, 这有利于提高冬小麦对水分的利用效率。

(3) 粉碎氮化秸秆连续 2 年还田后能显著提高冬小麦的籽粒产量, 效果较秸秆覆盖还田措施显著。粉碎并氮化秸秆还田措施能显著提高冬小麦的 W_{UE} 和 P_{UE} , 但对提高 W_{UE} 具有一定的迟效性。

参 考 文 献

- 1 吕雯, 汪有科. 不同秸秆还田模式冬麦田土壤水分特征比较[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 68-71.
Lü Wen, Wang Youke. Study on soil moisture of different tillage measures under straw mulch[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 68-71. (in Chinese)
- 2 Singha G, Laryeab K B, Karwasrac S P S, et al. Tillage methods related to soil and water conservation in south Asia[J]. Soil & Tillage Research, 1993, 27(1-4): 273-282.
- 3 Franzluebbers A J. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 66(2): 197-205.
- 4 李伟, 蔺树生, 谭豫之, 等. 作物秸秆综合利用的创新技术[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 14-17.
Li Wei, Lin Shusheng, Tan Yuzhi, et al. Innovated techniques on comprehensive utilization of crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(1): 14-17. (in Chinese)
- 5 Spaccini R, Piccolo A, Haberhauer G, et al. Decomposition of maize straw in three European soils as revealed by DRIFT spectra of soil particle fractions[J]. Geoderma, 2001, 99(3-4): 245-260.
- 6 Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. Geoderma, 2007, 137(3-4): 360-369.
- 7 Sonnleitner R, Lorbeer E, Schinne F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 195-204.
- 8 Sarkar S, Paramanick M, Goswami S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson (*Brassica napus* L. var. *glauca*) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(1): 94-101.
- 9 Bekku Y S, Nakatsubo T, Kume A, et al. Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils[J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 205-210.
- 10 Kim S H, Gitz D C, Sicher R C, et al. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 61(3): 224-236.
- 11 蔡太义, 贾志宽, 孟蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 43-48.
Cai Taiyi, Jia Zhikuan, Meng Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 43-48. (in Chinese)
- 12 Sonnleitner R, Lorbeer E, Schinner F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a

- chernozem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 195 - 204.
- 13 Cabiles D M S, Angeles O R, Johnson-Beebout S E. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98(2): 211 - 216.
- 14 Tarafdar J C, Meena S C, Kathju S. Influence of straw size on activity and biomass of soil microorganisms during decomposition[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001, 37(3): 157 - 160.
- 15 Henriksen T M, Breland T A. Decomposition of crop residues in the field: evaluation of a simulation model developed from microcosm studies[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(10): 1423 - 1434.
- 16 王珍,冯浩,吴普特,等. 土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 114 - 119.
Wang Zhen, Feng Hao, Wu Pute, et al. Effects of soil amendment fertilizers on yield and water use efficiency of spring maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11): 114 - 119. (in Chinese)
- 17 毛华明,朱仁俊,冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸秆对泌乳牛生产性能的影响[J]. *云南农业大学学报*, 1999, 14(2): 167 - 170.
Mao Huaming, Zhu Renjun, Feng Yanglian. Effects on the performances of holstein cows fed pelleted barley straw treated with urea and calcium hydroxide[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 1999, 14(2): 167 - 170. (in Chinese)
- 18 王增丽,王珍,冯浩. 预处理秸秆对土壤蒸发及秸秆分解率的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(9): 816 - 821.
Wang Zengli, Wang Zhen, Feng Hao. Effects of pretreated straws on soil evaporation and straw decomposition rate[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(9): 816 - 821. (in Chinese)
- 19 Clothier B, Green S. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water[J]. *Agricultural Water Management*, 1994, 25(1): 1 - 12.
- 20 王淑芬,张喜英,裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 27 - 32.
Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 27 - 32. (in Chinese)
- 21 王珍,冯浩,吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(3): 533 - 539.
Wang Zhen, Feng Hao, Wu Shufang. Effects of different straw-incorporation methods on soil water retention capacity and evaporation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(3): 533 - 539. (in Chinese)
- 22 陈素英,张喜英,裴冬,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 171 - 173.
Chen Suying, Zhang Xiying, Pei Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10): 171 - 173. (in Chinese)
- 23 王珍,冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 224 - 251.
Wang Zhen, Feng Hao. Study on the influence of different straw-returning manners on soil structure and characters of soil water evaporation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(6): 224 - 251. (in Chinese)
- 24 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(11): 60 - 67
Xie Wenyan, Fan Guisheng, Zhou Huaiping, et al. Effect of straw incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 60 - 67. (in Chinese)
- 25 严昌荣,居辉,彭世琪,等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 11 - 14.
Yan Changrong, Ju Hui, Peng Shiqi, et al. Soil moisture dynamic characteristics of dryland field in northern China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 11 - 14. (in Chinese)
- 26 陈连海,冯浩,杜健. 土壤扩蓄增容肥对土壤养分含量及小麦产量影响的试验研究[J]. *生态经济*, 2009, 10(2): 6 - 10.
Chen Lianhai, Feng Hao, Du Jian. Study on the effect of soil fertility and yield of the soil magnistorage compatibilizer[J]. *Ecological Economy*, 2009, 10(2): 6 - 10. (in Chinese)
- 27 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 Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no tillage 2 years later [J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2008, 41(4): 78 - 85. (in Chinese)
- 28 王增丽,冯浩,余坤,等. 轮作条件下秸秆施用方式对农田水分及作物产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 114 - 119.
Wang Zengli, Feng Hao, Yu Kun, et al. Effects of different straw utilization on farmland moisture and crop yield with rotation of summer maize and winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 114 - 119. (in Chinese)

Effects of Different Pretreated Straw on Soil Water Content and Water Consumption Characteristics of Winter Wheat

Yu Kun¹ Feng Hao^{1,2} Li Zhengpeng¹ Wang Zengli³

(1. Chinese National Academy of Water-saving agriculture in arid region, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China

2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shannxi 712100, China

3. Wuwei Integrated Service Centre on Water Conservancy Technologies of China, Wuwei 733099, China)

Abstract: Two-year (2011—2013) field experiment was carried out to investigate the effects of straw pretreatment (comminuted or ammoniated) on soil moisture dynamics (0 ~ 100 cm depth) in the whole growth period of winter wheat, crop water consumption, water use efficiency (W_{UE}) and precipitation use efficiency (P_{UE}). The results showed that the changes in soil water storage (0 ~ 100 cm depth) under all experimental treatments were similar in the whole winter wheat growing period in 2 -consecutive-year. The ammoniated straw application increased soil water storage (0 ~ 100 cm depth) by 4.95% and 1.82% at the maturity stage significantly in two years respectively more than conventional straw mulching, and by 4.24% and 1.75% more than unammoniated straw application. In terms of crop water consumption, conventional straw mulching, compared with conventional straw incorporation, effectively reduced the total water consumption in the growing periods of winter wheat. In addition, the comminuted-ammoniated straw application, compared with unammoniated straw application, also observably reduced the total water consumption at the late growth stage of winter wheat, which promoted the use of irrigation and precipitation by winter wheat. Pretreatment (comminuted-ammoniated) straw application, compared with conventional straw mulching, significantly increased the grain yield of winter wheat by 9.07% and 11.42% in 2 years respectively, which improved winter wheat W_{UE} and P_{UE} significantly as well.

Key words: Comminuted Ammoniated Straw Soil water storage Winter wheat Water consumption characteristics

(上接第 158 页)

Application of 0 – 1 Programming Model on Optimization of Crop Deficit Irrigation Schedule

Mao Xiaomin¹ Shang Songhao²

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A 0 – 1 programming model was proposed to optimize the deficit irrigation schedule. It is based on the concept of field water balance and the crop water production function, and introduces a 0 – 1 variable to describe the irrigation decision in possible irrigation periods. Microsoft Excel solver is applied for finding the solution. This model was applied in the irrigation schedule optimization of winter wheat in Xiaohe irrigation district in Shanxi Province. The result compares well with a previous developed simulation based optimization model, while the present model is much simpler in the solving procedure. Results demonstrate that the key period for winter wheat irrigation is the later jointing stage in early May. If the initial soil water content is low, the suitable irrigation time should be earlier in order to achieve higher crop yield. The evapotranspiration and relative crop yield increase with the irrigation volume, while the marginal yield decreases with the irrigation volume.

Key words: Deficit irrigation 0 – 1 programming Farmland water balance Crop water production function