

# 轮作条件下秸秆施用方式对农田水分及作物产量的影响\*

王增丽<sup>1</sup> 冯浩<sup>1,2</sup> 余坤<sup>1</sup> 张春强<sup>2</sup> 王缠军<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 通过小区试验,研究了粉碎、氨化秸秆以及与无机土壤改良剂(硫酸钙)混合配施措施对土壤水分及作物产量的影响。结果表明,氨化秸秆利于提高土壤对降水的保蓄能力,显著增加0~100 cm土层土壤蓄水量。在夏玉米-冬小麦轮作中,氨化秸秆提高土壤蓄水能力主要反映在夏玉米苗期和冬小麦抽穗期。粉碎秸秆氨化与硫酸钙处理的夏玉米、冬小麦水分利用效率分别较粉碎秸秆覆盖提高了4.97%、30.32%,效果显著。氨化秸秆施入土壤的措施较未氨化秸秆覆盖还田的措施夏玉米、冬小麦产量分别提高4.56%~10.00%和6.65%~11.12%。

**关键词:** 秸秆 轮作 农田水分 作物产量 水分利用效率

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)12-0114-06

## Effects of Different Straw Utilization on Farmland Moisture and Crop Yield with Rotation of Summer Maize and Winter Wheat

Wang Zengli<sup>1</sup> Feng Hao<sup>1,2</sup> Yu Kun<sup>1</sup> Zhang Chunqiang<sup>2</sup> Wang Chanjun<sup>1</sup>

(1. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

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

**Abstract:** Field plot experiment was carried out to investigate the effects of the powdered, ammoniated straw and/or blending with inorganic soil amendment (calcium sulfate) on soil moisture and crop yields in summer maize and winter wheat rotation systems. The results showed that the ammoniated straw could improve soil storage ability for precipitation, compared with CK1, and significantly increase the soil water storage (0~100 cm). The ammoniated straw improving soil water storage ability was observed mainly in seedling stage of summer maize and heading stage of winter wheat in the crops rotation respectively. Treatment, the powdered and ammoniated straw blended with calcium sulfate, compared with CK1, could significantly increase economic yield of summer maize, winter wheat by 4.97% and 30.32%, respectively. The ammoniated straw returned to soil, compared with the unammoniated straw mulched soil, could distinctly increase yields of summer maize, winter wheat by 4.56%~10.00% and 6.65%~11.12%.

**Key words:** Straw Crop rotation Farmland moisture Crop yields Water use efficiency

### 引言

目前,秸秆还田已经成为改良土壤结构、维持土

壤肥力的重要手段之一。研究表明,对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<sup>[1]</sup>。在一定范围内随覆盖量的增加,抑制蒸发效

果增强<sup>[2]</sup>,能有效提高作物的产量和水分利用效率<sup>[3-4]</sup>。但也有研究表明,秸秆覆盖后发生的低温效应推迟了作物的生育期,随着秸秆覆盖量的增大,低温效应越明显<sup>[5-8]</sup>。韩思明对旱地小麦的试验研究结果表明,小麦在苗期时,秸秆覆盖处理较不覆盖处理的苗期小麦呈苗高、苗细、叶长、色淡的态势,总体呈徒长状态<sup>[9]</sup>,进而不同程度的导致作物减产<sup>[10]</sup>。因此,秸秆覆盖还田后对土壤水分及产量的促进作用具有一定的尺度范围<sup>[11]</sup>。有研究表明,低 C/N 的秸秆(如苜蓿秆)较常规作物秸秆,能显著改善土壤结构,进而提高土壤的水分含量<sup>[12-13]</sup>。

秸秆氨化处理常用于秸秆类饲料的加工储藏。利用液氨、尿素、碳氨作氨源调节还田作物秸秆的 C/N 比值,可促进秸秆木质素彻底变性,使酸性洗涤纤维、半纤维素和木质素含量下降,同时提高粗蛋白含量<sup>[14]</sup>,破坏角质层外层的酯类化合物。鉴于此,笔者将氨化处理的秸秆加入土壤,研究其对土壤水分的蓄持能力、夏玉米生长动态及水分利用效率的影响。

本文拟通过对秸秆进行粉碎、氨化处理后施入土壤,通过田间对比试验,研究轮作条件下秸秆处理方式与无机土壤改良剂(硫酸钙)混合配施对土壤水分及作物产量及水分利用效率的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验于 2010~2012 年在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院灌溉试验站进行。该灌溉试验站位于 N 34°20', E 108°24', 海拔 521 m, 所处地理位置属于暖温带季风半湿润气候区。站内地形平整,土层深厚,土壤质地为中壤土,1 m 土层的平均田间持水率为 23%~25%,凋萎含水率为 8.5% (以上均为质量含水率),平均干体积质量为 1.44 g/cm<sup>3</sup>。该站属渭河三道台塬地区,全年无霜期 221 d,地下水埋藏较深,其向上补给量可忽略不。

### 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。秸秆氨化处理参考毛华明<sup>[14]</sup>方法,以水溶液形式加入秸秆干质量 1.33% 的氮素(调整秸秆 C/N 值为 25)、4% 的氢氧化钙(过量),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温度为 35 ℃ 环境下培养 6 d 备用。

试验采用随机区组排列,重复 3 次,小区面积设

置为 24 m<sup>2</sup> (4 m × 6 m), 秸秆施用量为 2 800 kg/hm<sup>2</sup>, 硫酸钙改良剂施用量为 1 500 kg/hm<sup>2</sup>。试验区周围布置 2 m 宽的作物保护带。基肥施用量: 尿素为(N 含量 46%) 225 kg/hm<sup>2</sup>、磷酸二铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 48%) 112.5 kg/hm<sup>2</sup>, 其中尿素施肥量的 50% 在夏玉米大喇叭口期开沟侧施入土壤。夏玉米、冬小麦基肥、秸秆在播种前通过旋耕机一次性翻入耕层土壤。处理设置见表 1。

表 1 轮作试验田间设置

Tab. 1 Distribution of treatments in field

处理	处理内容
CK1	粉碎秸秆覆盖
CK2	长秸秆翻压还田
CN	长秸秆氨化
FN	粉碎秸秆氨化
CNT	长秸秆氨化 + 硫酸钙
FNT	粉碎秸秆氨化 + 硫酸钙

### 1.3 田间管理

夏玉米选用秦龙 11 号品种,播种量为 45 000 株/hm<sup>2</sup>。株距 40 cm,行距 60 cm,玉米在 4 叶期进行间苗、定苗。于 2011 年 6 月 19 日种植,2011 年 10 月 12 日收获,全生育期为 114 d,生育期有效降雨量为 616.5 mm。

冬小麦选用小偃 22 号,播种量 187.4 kg/hm<sup>2</sup>,行距 15 cm。于 2011 年 10 月 19 日种植,2012 年 6 月 5 日收获。全生育期为 236 d,生育期有效降雨量为 192.3 mm。在冬小麦全生育期内,气候干旱,因此在 2012 年 1 月 5 日和 2012 年 4 月 26 日分别补灌 90 mm 越冬水和拔节水。

### 1.4 测定项目与方法

#### (1) 土壤含水率

土壤含水率采用干燥法测定,在作物播种前和收获后分层测定 0~200 cm 土壤含水率,各生育阶段分层测定 0~100 cm 土壤含水率,土壤蓄水量为

$$W = 10HDB \quad (1)$$

式中  $W$ ——土壤蓄水量,mm

$H$ ——土层深度,cm

$D$ ——土壤体积质量,g/cm<sup>3</sup>

$B$ ——土壤质量含水率,%

#### (2) 测产与考种

收获时按小区计算产量,根据作物产量和耗水量计算水分利用效率。

$$E_T = W_1 - W_2 + P + I + K \quad (2)$$

$$W_{UE} = B_Y/E_T \quad (3)$$

$$E_C = G_Y/B_Y \times 100\% \quad (4)$$

式中  $E_T$ ——农田水分蒸散量,mm

$W_1$ 、 $W_2$ ——相邻两次取样 0~100 cm 土层蓄水量, mm

$P$ ——作物生育期降水量, mm

$I$ ——灌溉水量, mm

$K$ ——时段内地下水补给量, mm

$W_{UE}$ ——水分利用效率,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$

$E_C$ ——作物经济系数, %

$G_Y$ ——作物籽粒产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

$B_Y$ ——作物生物产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

由于该试验田地下水埋深 5 m 以下, 可视地下水补给量为零, 且降水入渗深度不超过 2 m, 可视深层渗漏为零。

### (3) 降水等气象资料

由西北农林科技大学灌溉试验站提供, 夏玉米、冬小麦全生育期总降水量及月平均气温见图 1。

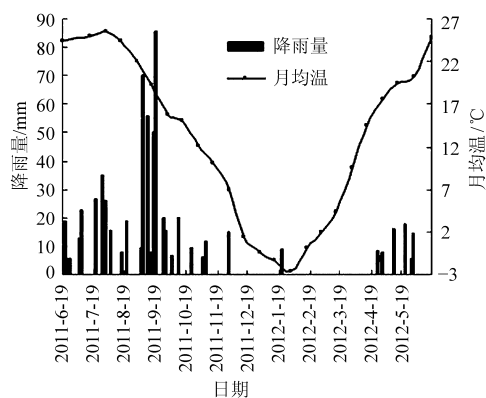


图 1 夏玉米、冬小麦生育期气温与降雨分布  
Fig. 1 Distribution of rainfall and mean monthly temperatures in crop growth period

## 1.5 数据分析

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。

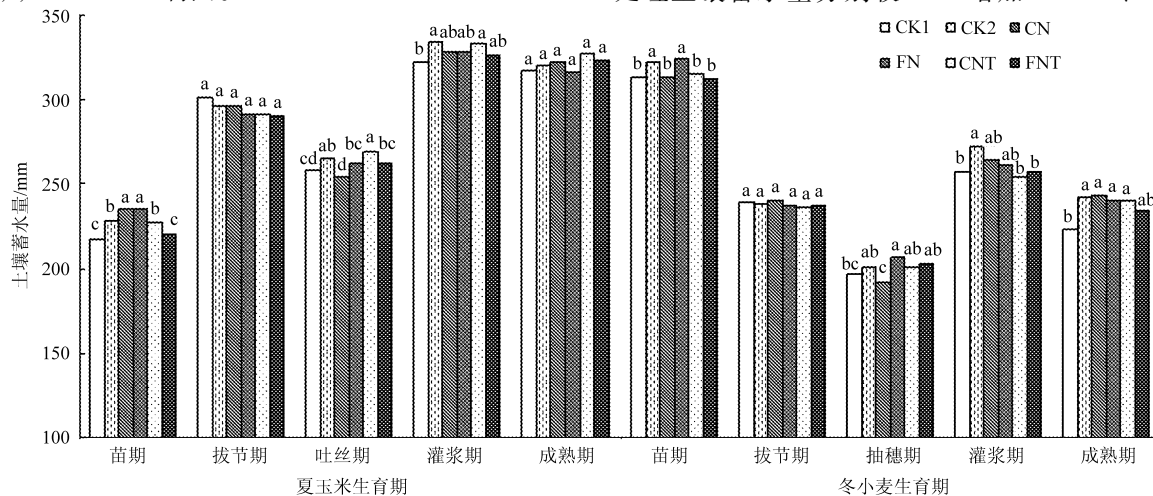


图 2 夏玉米、冬小麦不同生育期土壤蓄水量变化

Fig. 2 Accumulation amounts of soil water in 0~100 cm in summer maize and winter wheat growth period

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤蓄水量变化分析

夏玉米不同生育期 0~100 cm 土层土壤蓄水量变化见图 2。由图 2 可知, 在夏玉米苗期, CN、FN 处理 0~100 cm 土壤蓄水量分别较 CK1 增加 8.41%、8.09%, 较 CK2 增加 3.29%、2.98%, 差异显著。FNT、CNT 处理 0~100 cm 土壤蓄水量较 CK1 有所增加, 但无显著性差异。说明粉碎秸秆氮化与硫酸钙改良剂混合配施措施提升 0~100 cm 土壤蓄水量无明显交互作用。作物进入拔节期后, 由于降雨集中, 分配量较大 (有效降雨量为 112.3 mm), 各处理 0~100 cm 土壤蓄水量无明显差异。作物进入吐丝期后, 植株高度增加, 叶面积指数增大, 秸秆的处理方式对土壤蓄水量的影响差异逐渐减弱。其中, FN、CNT、FNT 处理 0~100 cm 土壤蓄水量分别较 CK1 增加 1.74%、4.34%、1.70%。作物进入灌浆期后, 秸秆的处理方式提升 0~100 cm 土壤蓄水量作用进一步减弱。试验结果表明, 在夏玉米苗期, 秸秆的还田措施对 0~100 cm 土壤蓄水量的影响最大。分析原因与夏玉米在播种—拔节期内, 外界气温高, 大气干燥, 棵间土壤蒸发量占蒸发蒸腾量的比例较大有关。

由冬小麦不同生育期 0~100 cm 土层土壤蓄水量动态变化可知, 在冬小麦苗期, CK2、FN、CNT 处理 0~100 cm 土壤蓄水量较 CK1 分别增加 2.74%、3.35%、0.48%, 其中 CK2、FN 处理与 CK1 差异显著。进入拔节期后, 由于对各小区均进行了等量灌水处理, 因此 0~100 cm 土壤蓄水量无显著性差异。在抽穗期内, 作物需水量增加, 各处理间 0~100 cm 土壤蓄水量差异亦逐渐增大。其中, FN、CNT、FNT 处理土壤蓄水量分别较 CK1 增加 5.08%、2.13%、

3. 10% , FN 处理与 CK1 差异显著。作物收获后, 对 0 ~ 100 cm 土壤蓄水量进行测定, 结果表明 CK2、CN、FN、CNT、FNT 处理土壤蓄水量分别较 CK1 增加 8. 23%、8. 94%、7. 42%、7. 51%、5. 05%。由此可知, 氨化秸秆翻压还田能有效提高 0 ~ 100 cm 土壤蓄水量。长度小于 50 mm 氨化秸秆提高 0 ~ 100 cm 土壤蓄水量效果基本一致。

## 2. 2 作物水分利用效率分析

作物耗水系数、水分利用效率见表 2。由表 2 可知, 夏玉米收获后, CN、FN、CNT、FNT 处理土壤贮水量分别较 CK1 增加 0. 94%、0. 43%、0. 68%、0. 92%, 差异显著。作物耗水系数分别较 CK1 降低 4. 31%、1. 91%、3. 11%、2. 01%。水分利用效率 (WUE) 分别较 CK1 增加 3. 27%、6. 54%、1. 39%、4. 95%。其中 FN 处理与 CK1 差异显著。由此可知, 秸秆施入土壤措施较覆盖措施提高土壤蓄水量,

降低农田蒸散量, 提高水分利用效率效果显著。

由方差分析结果可知, 冬小麦收获后, CN、FN、CNT、FNT 处理土壤蓄水量分别较 CK1 提高 8. 95%、7. 41%、7. 48%、7. 07%, 差异显著。耗水系数分别较 CK1 降低 10. 14%、8. 52%、11. 56%、12. 78%; WUE 分别较 CK1 提高 25. 18%、14. 29%、21. 80%、30. 32%, 差异显著。其中粉碎氨化秸秆与硫酸钙混合配施提高幅度最高。

在夏玉米试验中, 各处理 WUE 与 CK1 未呈显著性差异, 分析原因可能与夏玉米生育期内降雨量大且分配集中有关。试验研究结果表明, 秸秆还田措施具有增加土壤蓄水量, 降低农田蒸散量, 提高 WUE 的作用。粉碎氨化秸秆以及与硫酸钙混合配施措施降低了作物耗水系数, 提高当季作物 WUE 效果显著。

表 2 轮作条件下作物耗水系数和水分利用效率分析

Tab. 2 Analysis of water use coefficient and water use efficiency of crops

农作物	处理	播前土壤蓄水量/mm	收获后土壤贮水量/mm	$E_T$ /mm	耗水系数/mm·kg <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup>	$W_{UE}$ /kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup>
夏玉米	CK1	206. 84	316. 83 <sup>c</sup>	584. 77	0. 099 7	17. 29 <sup>ab</sup>
	CK2	206. 84	320. 21 <sup>bc</sup>	581. 51	0. 101 7	16. 45 <sup>b</sup>
	CN	206. 84	321. 77 <sup>ab</sup>	581. 76	0. 095 4	17. 86 <sup>a</sup>
	FN	206. 84	324. 05 <sup>ab</sup>	584. 75	0. 097 8	18. 42 <sup>a</sup>
	CNT	206. 84	327. 29 <sup>a</sup>	582. 60	0. 096 6	17. 53 <sup>ab</sup>
	FNT	206. 84	322. 65 <sup>ab</sup>	581. 85	0. 097 7	18. 15 <sup>a</sup>
冬小麦	CK1	244. 70	223. 63 <sup>b</sup>	455. 47	0. 049 3	29. 82 <sup>c</sup>
	CK2	239. 72	242. 01 <sup>a</sup>	427. 58	0. 043 8	37. 37 <sup>ab</sup>
	CN	247. 47	243. 64 <sup>a</sup>	442. 20	0. 044 3	37. 33 <sup>ab</sup>
	FN	252. 91	240. 19 <sup>a</sup>	447. 47	0. 045 1	34. 08 <sup>b</sup>
	CNT	252. 54	240. 35 <sup>a</sup>	438. 60	0. 043 6	36. 32 <sup>ab</sup>
	FNT	252. 61	239. 43 <sup>a</sup>	439. 25	0. 043 0	38. 86 <sup>a</sup>

注: 同行有相同字母表示差异不显著 ( $P < 0. 05$ ), 下同。

## 2. 3 作物产量特征值分析

### 2. 3. 1 夏玉米产量分析

夏玉米产量特征值见表 3。由表可知, 秸秆的处理方式对夏玉米的产量特征值具有明显的差异。CN、FN、CNT、FNT 处理经济产量较 CK1 分别增加 5. 89%、4. 56%、5. 85% 和 10. 00%, 较 CK2 分别增加 3. 95%、2. 64%、3. 91% 和 7. 99%。其中 CN、

CNT、FNT 处理分别与 CK1、CK2 差异达显著性水平。CN、CNT、FNT 处理经济系数分别较 CK1 提高 5. 84%、7. 09%、9. 27%, 差异显著。由此可知, 调整 C/N 后的秸秆施入土壤较覆盖措施更能显著提高夏玉米的经济产量。此外, 由 CN、FN 处理经济产量分析可知, 长度小于 50 mm 的秸秆氨化后还田对夏玉米经济产量差异不显著。

表 3 夏玉米产量特征值

Tab. 3 Evaluation indexes of summer maize under different straw utilization treatments

处理	株高/cm	茎粗/mm	穗位高/cm	百粒质量/g	经济产量/kg·hm <sup>-2</sup>	$E_C$ /%
CK1	218. 50 <sup>c</sup>	20. 155 <sup>b</sup>	75. 17 <sup>b</sup>	475. 2 <sup>b</sup>	6 200. 0 <sup>d</sup>	49. 5 <sup>bc</sup>
CK2	232. 75 <sup>ab</sup>	19. 830 <sup>b</sup>	79. 67 <sup>ab</sup>	519. 2 <sup>ab</sup>	6 315. 5 <sup>cd</sup>	52. 5 <sup>ab</sup>
CN	231. 25 <sup>ab</sup>	20. 083 <sup>b</sup>	81. 83 <sup>ab</sup>	487. 8 <sup>ab</sup>	6 565. 0 <sup>b</sup>	50. 5 <sup>bc</sup>
FN	226. 50 <sup>bc</sup>	21. 265 <sup>a</sup>	81. 83 <sup>ab</sup>	499. 6 <sup>ab</sup>	6 482. 5 <sup>bc</sup>	48. 5 <sup>c</sup>
CNT	234. 00 <sup>ab</sup>	20. 913 <sup>a</sup>	83. 83 <sup>ab</sup>	499. 4 <sup>ab</sup>	6 562. 5 <sup>b</sup>	52. 0 <sup>ab</sup>
FNT	238. 75 <sup>a</sup>	20. 977 <sup>a</sup>	85. 50 <sup>a</sup>	530. 4 <sup>a</sup>	6 820. 0 <sup>a</sup>	54. 5 <sup>a</sup>

### 2.3.2 冬小麦产量分析

冬小麦产量特征值见表4。由表可知,CK2、CN、FN、CNT、FNT处理株高分别较CK1增加3.61%、5.65%、6.33%、3.61%、9.50%,与CK1差异显著。说明秸秆施入土壤较覆盖措施促进作物营养生长效果显著。此外,各处理较CK1具有提高冬小麦穗粒数,但差异不显著。CN、FN、CNT、FNT处理 $1\text{ m}^2$ 有效穗数研究结果表明,秸秆经过氨化措施后能显著提高单位面积冬小麦的有效穗数,各处理

分别较CK1增加19.26%、18.16%、29.69%、33.25%,差异显著。CN、FN、CNT、FNT处理经济产量分别较CK1提高9.58%、9.08%、6.65%、11.12%,差异显著;较CK2提高5.91%、5.42%、3.07%、7.39%,其中,FNT处理与CK2差异显著。试验结果表明,氨化秸秆施入土壤后能显著促进作物的营养生长,提高作物的经济产量,氨化后效果更加显著。但其与硫酸钙改良剂混合配施提高作物经济产量交互作用不明显。

表4 冬小麦产量特征值

Tab.4 Evaluation indexes of winter wheat under different straw utilization treatments

处理	株高/cm	穗粒数/粒	$1\text{ m}^2$ 有效穗数/穗	千粒质量/g	经济产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	$E_C/\%$
CK1	73.67 <sup>d</sup>	37.9 <sup>ab</sup>	815 <sup>c</sup>	48.47 <sup>a</sup>	8275.69 <sup>c</sup>	49.1 <sup>a</sup>
CK2	76.33 <sup>c</sup>	38.9 <sup>ab</sup>	821 <sup>c</sup>	47.74 <sup>ab</sup>	8562.74 <sup>bc</sup>	40.5 <sup>b</sup>
CN	77.83 <sup>bc</sup>	40.9 <sup>a</sup>	972 <sup>b</sup>	46.24 <sup>c</sup>	9068.83 <sup>ab</sup>	40.9 <sup>b</sup>
FN	78.33 <sup>b</sup>	39.7 <sup>ab</sup>	963 <sup>b</sup>	46.68 <sup>c</sup>	9026.92 <sup>ab</sup>	43.6 <sup>ab</sup>
CNT	76.33 <sup>c</sup>	36.9 <sup>b</sup>	1057 <sup>a</sup>	46.82 <sup>ab</sup>	8826.01 <sup>ab</sup>	43.6 <sup>ab</sup>
FNT	80.67 <sup>a</sup>	40.0 <sup>ab</sup>	1086 <sup>a</sup>	46.18 <sup>c</sup>	9195.85 <sup>a</sup>	41.9 <sup>ab</sup>

## 3 讨论

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。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蓄能力,提高降水利用率<sup>[15]</sup>。对农田采用保护性耕作技术,特别是在干旱年份,有利于将降水蓄存于深层土壤,以供下季作物生长需要<sup>[16]</sup>。解文艳、严昌荣研究结果表明<sup>[17-18]</sup>,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,这与本文研究结果相一致。此外,有研究结果表明,粉碎、氨化秸秆施入土壤后能显著提高土壤持水能力,提升持水能力主要表现在低吸力段内<sup>[19]</sup>。

## 4 结论

(1) 粉碎、氨化秸秆施入土壤后能显著提高0~100 cm土层的土壤蓄水量,降低农田蒸散量,有利

于提高土壤对降水的保蓄能力,为下季作物生长提供有利的水分条件。

(2) 在夏玉米生育期,秸秆的处理方式主要影响苗期0~100 cm土壤的蓄水量。秸秆覆盖措施具有提高0~100 cm土壤蓄水量的作用,氨化秸秆施入土壤后提高效果更加显著。在冬小麦生育期内,秸秆的处理方式主要影响作物在抽穗期0~100 cm土壤的蓄水量。其中粉碎氨化秸秆提高土壤蓄水量效果显著。在整个试验周期,氨化秸秆与硫酸钙改良剂混合配施措施提高土壤蓄水量无明显的交互作用。

(3) 氨化秸秆施入土壤措施较未氨化秸秆覆盖还田措施夏玉米、冬小麦产量分别提高4.56%~10.00%和6.65%~11.12%。其中,粉碎氨化秸秆与硫酸钙混合配施措施夏玉米、冬小麦 $W_{UE}$ 分别较CK1提高4.97%、30.32%,提高当季作物WUE效果显著。氨化秸秆施入土壤后,在提高土壤水分和作物经济产量和水分利用效率方面具有明显的促进作用。

## 参 考 文 献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Unger P W. Straw mulch effects on soil temperatures and sorghum germination and growth [J]. Agronomy Journal, 1978, 70(5): 858~864.
- 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 and Tillage Research, 2007, 93(1): 94~101.

- 7 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.
- 8 Kim S H, Gitz D C, Sicher R C, et al. Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO<sub>2</sub> [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(3): 224 ~ 236.
- 9 韩思明, 杨春峰, 史俊通, 等. 旱地残茬覆盖耕作法的研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 1988, 22(3): 1 ~ 12.  
Han Siming, Yang Chunfeng, Shi Juntong, et al. Stubble mulching in dry land on the loess plateau in China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1988, 22(3): 1 ~ 12. (in Chinese)
- 10 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 Yajun, Li Shengxiu. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 15 ~ 19. (in Chinese)
- 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 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): 1 423 ~ 1 434.
- 13 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.
- 14 毛华明, 朱仁俊, 冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸颗粒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)
- 15 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)
- 16 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 Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 78 ~ 85. (in Chinese)
- 17 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)
- 18 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.
- 19 王增丽, 冯浩, 方圆. 麦秸预处理方式对黄绵土结构及低吸力段持水性的影响 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(7): 56 ~ 62, 72.  
Wang Zengli, Feng Hao, Fang Yuan. Effect of pretreated wheat straw on soil aggregate and water-holding capacity within low suctions in loess soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(7): 56 ~ 62, 72. (in Chinese)

(上接第 168 页)

- 11 刘荣厚, 王远远, 孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(9): 116 ~ 121.  
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9): 116 ~ 121. (in Chinese)
- 12 刘爽, 李文哲. 牛粪与餐厨废弃物混合比例对厌氧发酵产氢的影响 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(3): 114 ~ 118.  
Liu Shuang, Li Wenzhe. Effects of mixing ratio on hydrogen production from anaerobic co-fermentation of cattle manure and food waste [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(3): 114 ~ 118. (in Chinese)
- 13 Lissens G, Vandevivere P, de Baere L, et al. Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion [J]. *Water Science & Technology*, 2001, 44(8): 91 ~ 102.
- 14 黄鼎曦, 陆文静, 王洪涛. 农业蔬菜废物处理方法研究进展和探讨 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(11): 38 ~ 42.
- 15 Dupla M, Conte T, Bouvier J, et al. Dynamic evaluation of a fixed bed anaerobic digestion process in response to organic overloads and toxicant shock loads [J]. *Water Science & Technology*, 2004, 49(1): 61 ~ 68.
- 16 Pare T, Dinel H, Schnitzer M, et al. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26(3): 173 ~ 178.
- 17 鲍艳宇, 周启星, 颜丽, 等. 畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 374 ~ 380.  
Bao Yanyu, Zhou Qixing, Yan Li, et al. Dynamic changes of nitrogen forms in livestock manure during composting and relevant evaluation indices of compost maturity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 374 ~ 380. (in Chinese)
- 18 乔汪砚, 王惠生, 杨鹏, 等. 臭氧在蔬菜废弃物发酵液深度处理中的应用 [J]. *环境工程*, 2012, 30(1): 35 ~ 38.  
Qiao Wangyan, Wang Huisheng, Yang Peng, et al. The application of ozone in treatment of the aerobic fermentation liquid of vegetable wastes [J]. *Environmental Engineering*, 2012, 30(1): 35 ~ 38. (in Chinese)