

辽西旱农区深层水肥调控对土壤主要物理性质和玉米产量的影响

黄毅¹, 王瑞丽¹, 赵凯²

(1. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110866; 2. 建平县土壤肥料工作站, 辽宁 朝阳 122000)

摘要: 针对辽西旱农区耕地土壤存在的“旱、薄、瘦”问题, 进行了机械化秸秆深还和化肥深施试验以及翌年免耕种植玉米的组合技术试验。结果表明: (1) 处理间表层(0~10 cm)容重变幅均在 1.25~1.27 g·cm⁻³之间, 土层 10~20 cm 处理之间差异明显, 对照区容重 1.55~1.57 g·cm⁻³, 秸秆深还和化肥深施处理土壤容重大幅降低, 秸秆深还处理秸秆集中的层次(20~30 cm)土壤容重在 1.2 g·cm⁻³以下, 且比较稳定。(2) 试验的第一年, 秸秆深还和化肥深施处理的土壤含水量随耕深的增加而上升, 到 20~30 cm 土层秸秆深还处理由于秸秆吸水而土壤含水量陡然降至 11.45%, 翌年干旱的情况下, 降水量由 193.9 mm 下降到 35.1 mm, 对照区各层次土壤含水量明显低于其他两种处理, 秸秆集中层次的土壤含水量仍保持在 16.39%。(3) 2010 年秸秆深还和化肥深施处理的玉米平均产量分别达到 13 094.3 kg·hm⁻²和 12 782.66 kg·hm⁻², 分别比传统耕作增产 9.04%和 6.44%。2011 年全年的降水量比上一年减少了 158.8 mm, 两项新技术的玉米平均产量仍能保持在 12 053.10 kg·hm⁻²和 11 523.45 kg·hm⁻², 分别比传统耕作增产 9.64%和 4.82%。由此可以看出, 两项技术具有松土扩容功能、深层蓄水的缓冲功能、御旱增产功能。

关键词: 秸秆深还; 化肥深施; 玉米; 增产

中图分类号: S157.4; S156.93; S513.048 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)01-0008-06

Effects of deep moisture and fertility regulation on main physical properties of soil and yield of maize in dryland regions in western Liaoning Province

HUANG Yi¹, WANG Rui-li¹, ZHAO Kai²

(1. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Jianping Country Soil and Fertilizer Workstation, Chaoyang, Liaoning 122000, China)

Abstract: In view of the problems of drought, shallow plough layer and low fertility in the arable soil of dryland regions in western Liaoning Province, the experiment of integrated technologies of mechanized deep straw placement, deep fertilizer application and no-till planting of maize were carried out. The results showed that: (1) The variation range of bulk density of surface soil under deep straw placement and deep fertilizer application was 1.25~1.27 g·cm⁻³, and there was a significant difference among the treatments in the soil layer of 10~20 cm, while the soil bulk density of the control was 1.55~1.57 g·cm⁻³. The soil bulk density in the layer with centralized straw placement was lower than 1.2 g·cm⁻³ and more stable. (2) The soil water content in 2010 increased with the increment of tillage depth under deep straw placement and deep fertilizer application, but it suddenly decreased to 11.45% in 20~30cm soil layer under deep straw placement due to the water absorption of straw. In 2011 when the rainfall reduced from 193.9 mm to 35.1 mm, the soil water content in all layers under these two treatments was higher than that under the control, and in straw concentration layer it still remained at 16.39%. (3) In 2010, the average yield of maize was 13 094.3 kg·hm⁻² and 12 782.66 kg·hm⁻² under deep straw placement and deep fertilizer application respectively, being increased by 9.04% and 6.44% respectively compared with that under the control. In 2011, although the annual rainfall was 158.8 mm lower than that in 2010, the average yield of maize could still reached at 12 053.10 kg·hm⁻² and 11 523.45 kg·hm⁻² respectively under these two new technologies, with a increase rate of 9.64% and 4.82% respectively compared with that under the con-

收稿日期: 2012-07-14

基金项目: 农业部行业(农业)专项资金项目“北方主要作物抗旱节水综合技术与区域示范”(200903007-8)

作者简介: 黄毅(1956—), 男, 辽宁朝阳人, 研究员, 主要从事旱作农业、水土保持、水资源与农业节水方面的研究。E-mail: emhuangyi@163.com.

trol. te of 9.64% and 4.82% respectively compared with that under the control.

Keywords: deep straw placement; deep fertilizer application; maize; yield increase

辽西旱农区是指辽宁西部的朝阳、阜新、锦州、葫芦岛四个市,总面积 $5.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占辽宁全省总面积的 34.80%。该区有耕地 $2.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中无灌溉条件的耕地占 77%,主要以旱作玉米为主。2007—2009 年辽宁省耕地调查结果显示,该区粮食生产存在三个关键的制约因素,一是降水资源的年内分配不均^[1],春旱频率在 90%^[2],秋吊和卡脖子也经常发生,春季受旱面积达旱耕地面积的 80%。二是三十多年来的个体耕种管理和农机的小型化,无力进行土壤的深层改良和培肥^[3],全区土壤耕层仅有 15~17 cm,土壤的水、肥库容严重萎缩。耕层浅薄,坡耕地的径流系数高达 0.5 以上,化肥利用率仅 20%~30%,秸秆资源的大量浪费,利用率不足 50%。三是地力不足,全区 90%旱坡耕地土壤有机质含量^[4]在 $10 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下(按耕地地力评价标准^[5]属于较缺乏水平)。三大制约因素导致全区土壤综合肥力低下,农业后劲不足,粮食产量不稳,严重灾害时,绝收面积达 $2.5 \sim 3.0 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。针对上述影响粮食可持续生产的关键问题,研究机械

化秸秆深还、化肥深施及其覆膜高产栽培技术^[6],分析阐述其改土培肥、提高玉米产量效果,为辽西旱农区地力提升和农业的可持续发展提供有力的技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地基本条件

试验地选择在具有典型旱区特点的建平县杨树岭乡卧龙岗村瓦房组,其气候属半湿润、半干旱季风型大陆性气候。雨热同季,全年平均气温 7.6°C ,最高气温 37°C ,最低气温 -36.9°C ,年均日照时数 $2\ 850 \sim 2\ 950 \text{ h}$ 。多年平均降水量为 430 mm,其中试验年度降水量 2009 年为 223.4 mm,2010 年为 514.4 mm,多集中在 6—8 月份,2009 年 6—8 月份降水量 83.5 mm,2010 年 6—8 月份降水量 168.5 mm。无霜期 120~155 d。春秋两季多风易旱,风力一般 2~3 级,冬季盛行西北风,风力较强。试验地的地形为 $\leq 5^\circ$ 的缓坡地,试验区土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of tested soil

层次 Layer	深度 Depth /cm	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度 Porosity /%	有机质 Organic matter /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
耕作层 Plow layer	0~14	1.35	45.51	6.2	31	93	211
犁底层 Plow sole	14~18	1.50	44.59	4.8	30	89	230
淀积层 Illuvial horizon	18~69	1.42	38.68	2.9	25	38	232
钙积层 Calcic horizon	69~100	1.63	32.13	2.0	23	31	214

1.2 试验处理

试验设 3 个处理,见表 2。

1.3 种植模式与方法

2010 年试验种植模式采用大垄双行二比空模式,即种两行空一行,种植耐密玉米郑单 958,种植模式见图 1。

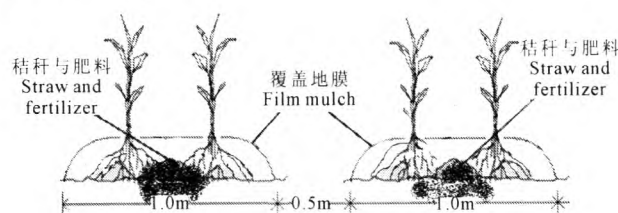


图 1 深层水肥调控试验种植模式

Fig. 1 Planting mode for deep moisture and fertility regulation

2011 年在上一年的大垄双行上实施全免耕,即在茬间按原品种、原密度播种,补施 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ BB 肥(N:P:K = 10:10:10)。

1.4 土壤改良效果测定方法

土壤容重采用环刀法^[7];土壤含水率采用烘干法^[8];玉米产量采用小区实收法计算。

2 结果与分析

2.1 不同深层水肥调控处理对土壤容重的影响

三种试验处理于 2009 年 10 月 20 日实施,分别在 2010、2011、2012 年春播前(5 月 25 日)对各个试验小区 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 土层的土壤容重进行了测定,结果见图 2~图 5。

表 2 深层土壤水肥调控试验处理

Table 2 Treatments for moisture and fertility regulation in deep soil

处理编号 Code	处理名称 Treatments	耕作 Tillage	施肥/(kg·hm ⁻²) Fertilization	品种密度/(株·hm ⁻²) Variety and density
1	CK(传统耕作) Traditional tillage	播前灭茬,传统犁开沟播种。 Clean residues, and then sow in furrows made by a traditional plow.	N:234 P ₂ O ₅ :288 K ₂ O:229.5	63000 ~ 67500
2	化肥深施 Deep fertilizer application	翻转犁开沟,开沟深度 35 ~ 40 cm,底宽 30 cm,顶宽 60 cm;施肥后合垄覆膜,待翌年春季播种。 Make furrows with 35 ~ 40 cm depth, 30 cm bottom width and 60 cm top width by a pivot plow; apply fertilizer and then cover with soil and plastic film; sow in the following spring.	N:234 P ₂ O ₅ :288 K ₂ O:229.5	63000 ~ 67500
3	秸秆深还 Deep straw placement	翻转犁开沟,开沟深度 35 ~ 40 cm,底宽 30 cm,顶宽 60 cm;施入秸秆和化肥后合垄覆膜,待翌年春季播种。 Make furrows with 35 ~ 40 cm depth, 30 cm bottom width and 60 cm top width by a pivot plow; apply straw and fertilizer, and then cover with soil and plastic film; sow in the following spring.	N:234 P ₂ O ₅ :288 K ₂ O:229.5 秸秆 Straw:1200	63000 ~ 67500

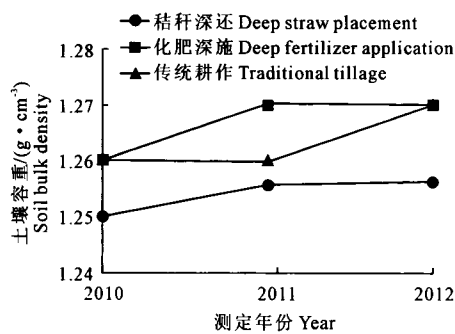


图 2 不同处理 0 ~ 10 cm 土壤容重的变化

Fig.2 Bulk density of soil in 0 ~ 10 cm under different treatments

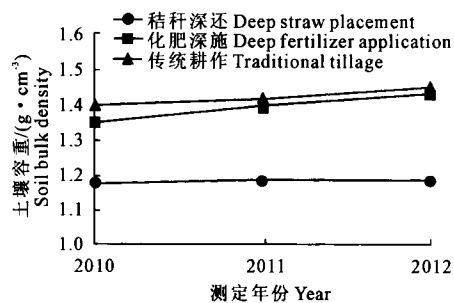


图 4 不同处理 20 ~ 30 cm 土壤容重的变化

Fig.4 Bulk density of soil in 20 ~ 30 cm under different treatments

图 2 的结果表明,由于表层土壤均比较疏松,试验处理间土壤容重测定值在 1.25 ~ 1.27 g·cm⁻³之间;到了 10 ~ 20 cm(图 3),处理间土壤容重变化明显,对照区的容重值在 1.55 ~ 1.57 g·cm⁻³,秸秆深还和化肥深施两个处理小区的土壤容重下降至 1.27 g·cm⁻³。由于秸秆的疏松作用,处理 3 试验小区的土壤容重值最小而且稳定,化肥深施处理由于没有

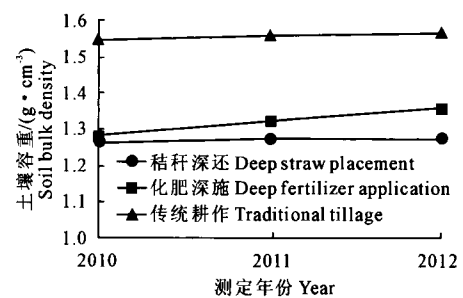


图 3 不同处理 10 ~ 20 cm 土壤容重的变化

Fig.3 Bulk density of soil in 10 ~ 20 cm under different treatments

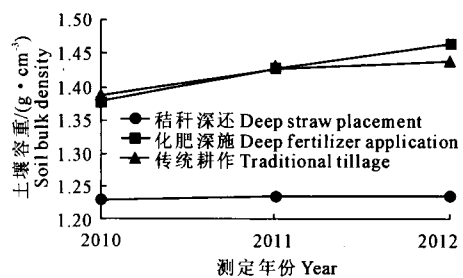


图 5 不同处理 30 ~ 40 cm 土壤容重变化

Fig.5 Bulk density of soil in 30 ~ 40 cm under different treatments

土壤有机质的作用,呈现出逐年沉实变硬的趋势。图 4 的试验结果进一步说明,处理 3 试验小区 20 ~ 30 cm 土层是大剂量秸秆深还(1.2 t·hm⁻²)集中的层次,其土壤容重始终保持在 1.20 g·cm⁻³以下,且不随时间加长而剧烈变化,松土的效果持续稳定。化肥深施的处理随着时间的延长,土壤逐渐沉实,土壤容重趋近于传统耕作。从图 5 可以看出,随着耕

作层次的加深,处理间的土壤容重出现了明显的分异,秸秆深还处理始终保持在一个疏松稳定的状态,化肥深施的处理随着时间的加长和层次加深,其改良效果持续的时间相对较短,已经恢复到改良前的原始状态。整个的土壤容重测定结果证明秸秆深还技术能够使土壤保持长期稳定的疏松状态,为玉米高产稳产创造有力的条件。

2.2 深层水肥调控处理对土壤水分的影响

为了证明不同措施对不同深度土壤的保水供水效果,在 2009 年秋季试验处理后,对 2010 年和 2011 年的降水量和蒸发量进行了观测记录,分析结果如图 6。与之对应,在这两年的春(5 月 25 日)、夏(7 月 25 日)、秋(9 月 25 日)对不同深度土层的土壤含水量进行了测定,结果如图 7~ 图 11。

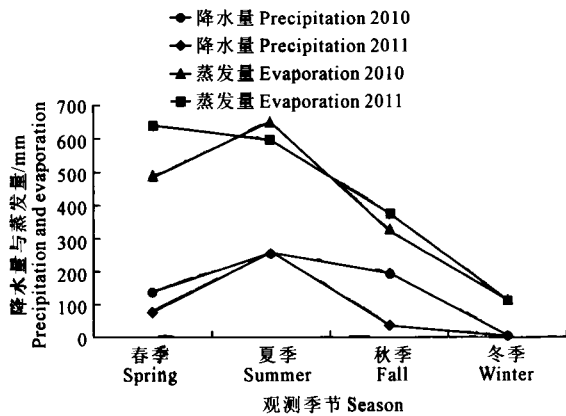


图 6 2010、2011 年深层水肥调控试验区降水量与蒸发量

Fig. 6 The precipitation and evaporation of test plot in 2010 and 2011

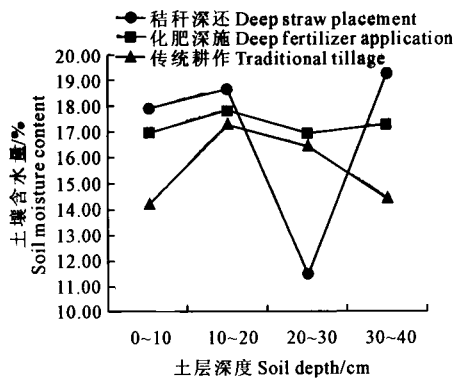


图 7 2010 年春季各处理土壤含水量

Fig. 7 Soil moisture in spring in 2010

由图 6 可以看出,2010、2011 两年的降水量与蒸发量在季节分布有很大差别,2010 年 3—5 月降水量高达 138.5 mm,蒸发量 484 mm,2011 年 3—5 月降水量仅为 77.5 mm,蒸发量却上升到 636.2 mm。夏季蒸发量趋近一致,秋季蒸发量基本相同,2011 年秋

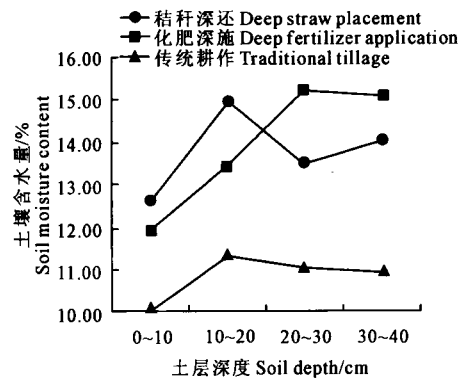


图 8 2010 年夏季各处理土壤含水量

Fig. 8 Soil moisture in summer in 2010

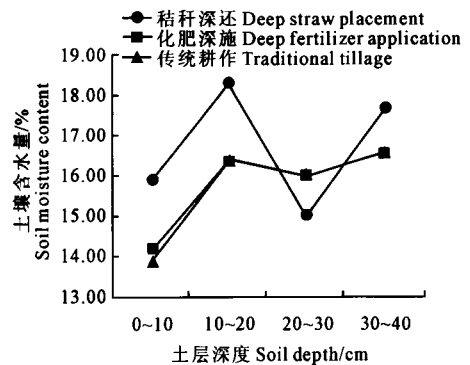


图 9 2010 年秋季各处理土壤含水量

Fig. 9 Soil moisture in fall in 2010

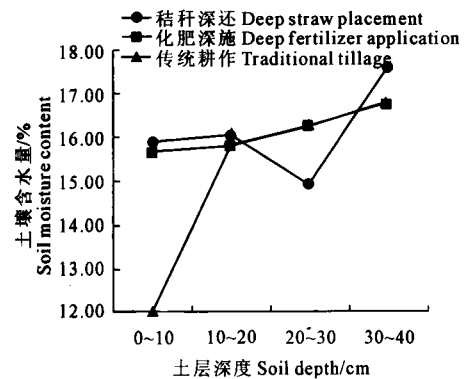


图 10 2011 年春季各处理土壤含水量

Fig. 10 Soil moisture in spring in 2011

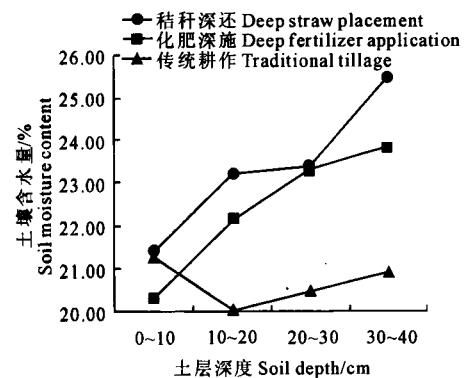


图 11 2011 年夏季各处理土壤含水量

Fig. 11 Soil moisture in summer in 2011

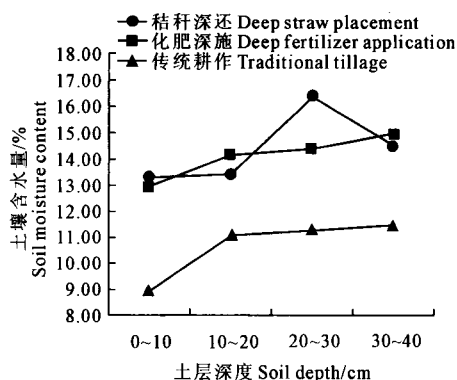


图 12 2011 年秋季各处理土壤含水量

Fig. 12 Soil moisture in fall in 2011

季降水量却少了 158.8 mm, 两年降水量和蒸发量的巨大反差引起了不同技术措施、不同层次的土壤水分变化。

图 7 结果显示, 在 2010 年降水量和蒸发量的条件下, 秸秆深还和化肥深施两种处理 0~10 cm 土层的土壤含水量分别为 17.89% 和 16.97%, 20~30 cm 土层秸秆深还处理的土壤含水量陡然降至 11.45%, 这是因为这个深度正是秸秆集中的部位, 土壤含水量下降是因为秸秆大量吸水并占据大量的空间, 这就证明秸秆深还能够拓展土壤蓄水空间。2010 年夏季的观测结果(图 8)显示, 对照区的土壤含水量在 10%~11% 之间波动, 而秸秆深还和化肥深施的处理仍保持在 12.6%~15.21% 的水平。秸秆层(20~30 cm)土壤含水量较上一层仍有下降, 但幅度变小, 秸秆的吸水进程变缓。

图 9 结果进一步显示, 2010 年秋季化肥深施处理与对照小区各层次的土壤含水量接近, 秸秆深还处理不同层次的土壤含水量仍有波动, 其幅度在 15.00%~18.28% 之间。这说明秸秆层的持水功能仍在发挥作用。

2011 年虽然降水量比上一年减少 158.8 mm, 但不同措施各土层的土壤含水量变化并不剧烈, 表现出秸秆深还、化肥深施两种技术的巨大蓄存、缓冲和持续供水功能。从图 10 可以看出, 2011 年春季各个试验处理除了对照 0~10 cm 土层含水量较低外, 其余处理各层次均保持在 15% 以上的土壤含水量。秸秆层土壤含水量有一个百分点的波动, 尚有缓慢的吸水过程。图 11 的试验结果可见, 在 2011 年夏季降水 255.6 mm 的情况下, 对照区的土壤含水量在 20%~21% 之间, 秸秆深还和化肥深施处理小区各层土壤含水量均随测定深度而上升, 秸秆层仍呈微弱的吸水状态。

2011 年秋季降水量比上年锐减, 由 193.9 mm 下降到 35.1 mm, 对照区各层次土壤含水量明显低

于其他两种处理, 秸秆深还和化肥深施的处理, 由于大机具的深耕扩容作用保持了相当的土壤水分, 因此使得各层土壤含水量随测定深度的增加而持续稳定地上升, 特别是秸秆深还处理的 20~30 cm 土层的土壤含水量在相对干旱的季节仍保持一个较高的水平, 说明当大剂量的秸秆通过大犁具机械化深还加深了耕层, 拓展了土壤的蓄水空间, 大剂量的秸秆经过一系列的吸水过程后把水分把持在疏松的土壤和秸秆中, 在土壤与作物相对干旱的时候, 持续不断地向外释放水分, 以此来满足作物的需要。

2.3 深层水肥调控对玉米产量的影响

为了证明机械化深层改土培肥技术的增产和持续生产以及周年御旱功能, 试验小区玉米实行不抽样全部收获, 避免人为的产量差异。待玉米含水量降至 14% 以下时对各小区计产并进行方差分析和 LSD 检验, 结果见表 3。

表 3 深层水肥调控处理对玉米产量的影响

Table 3 The effects of deep moisture and fertility regulation on yield of maize

处理 Treatments	玉米产量/(kg·hm ⁻²) Yield of maize	
	2010	2011
秸秆深还 Deep straw placement	13094.30aA	12053.10aA
化肥深施 Deep fertilizer application	12782.66bA	11523.45bB
传统耕作 Traditional tillage	12008.97cB	10993.80cC

表 3 的分析结果表明, 2010 年处理间达到 5% 的显著水平, 2011 年达到 1% 的极显著水平。2010 年由于深还的大剂量秸秆尚未充分腐熟, 其技术的增产作用大部分为深耕所致, 翌年玉米的增产和稳产是深耕、秸秆深还和化肥深施综合作用的结果。2011 年玉米产量形成的关键时期遭遇大旱, 降水量仅为 35.1 mm。尽管如此, 本试验的培肥技术还是表现出了强大的御旱功能和持续增产的优势。

3 结论与讨论

有关秸秆还田的研究日渐深入, 人们对秸秆还田作用及其机理^[9]研究的也越来越透彻, 目前规模较大的是结合玉米收获机械化而实施的粉碎浅层旋耕, 这种做法在秸秆还田一年后对土壤理化生物性质都有较好的作用与影响, 但是对秸秆还田的当年来说, 存在的还田部位浅、剂量小、土壤孔隙过大、漏风死苗, 秸秆分解时与植株争水争肥等严重问题^[10]。也不可能同时解决旱农区耕地存在的“旱、薄、瘦”问题, 因此深层水肥调控技术具备以下三方面的功能:

3.1 深层松土扩容功能

10~20 cm 土层,不同措施之间土壤容重变化明显,传统耕作的容重值在 $1.55 \sim 1.57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,实施秸秆深还和化肥深施技术土壤容重大幅度降低,由 $1.57 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 下降至 $1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。大剂量秸秆深还 ($1.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 集中的层次,其土壤容重始终保持在 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下,且不随时间的加长而剧烈变化,松土的效果持续稳定。化肥深施的处理随着时间的延长,土壤逐渐沉实,土壤容重趋近于传统耕作。

3.2 深层蓄水缓冲功能

试验的第一年,由于深耕的结果,土壤含水量随耕深而增加,到 20~30 cm 秸秆深还处理的土壤含水量陡然降至 11.45%,这是因为这个深度正是秸秆集中的部位,土壤含水量下降是因为秸秆大量吸水并占据大量的空间,随着时间的加长秸秆逐渐腐熟,吸水作用渐见微弱。翌年干旱的情况下,降水量由 193.9 mm 下降到 35.1 mm,对照区各层次土壤含水量明显低于其他两种处理,秸秆深还和化肥深施的处理,由于大机具的深耕扩容作用保持了相当的土壤水分,因此使得各层土壤含水量随测定深度的增加而持续稳定地上升,特别是秸秆深还处理的 20~30 cm 处的土壤含水量在相对干旱的季节仍保持在 16.39%,这就说明当大剂量的秸秆通过大犁具机械化深还加深了耕层,拓展了土壤的蓄水空间,大剂量的秸秆经过一系列的吸水过程后把水分保持在疏松的土壤和秸秆中,在土壤与作物相对干旱的时候,持续不断地向外释放水分。

3.3 御旱增产功能

2010年秸秆深还和化肥深施技术的玉米平均

产量分别达到 $13\ 094.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $12\ 782.66 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别比传统耕作增产 9.04% 和 6.44%。2011年全年的降水量比上一年减少了 158.8 mm,且正值玉米产量形成的关键时期遭遇大旱,这一时期的降水量仅为 35.1 mm,秸秆深还和化肥深施技术的玉米平均产量分别达到 $12\ 053.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $11\ 523.45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别比传统耕作增产 9.64% 和 4.82%。由此可以看出,所试验的培肥技术表现出了强大的御旱功能和持续增产的优势。

参考文献:

- [1] 张玉龙,黄毅,邹洪涛,等. 辽西地区干旱特征与降雨资源调控的可行性分析[J]. 农业科技与装备, 2007, (6): 10-11.
- [2] 黄毅,张玉龙,邹洪涛,等. 辽西北旱农区的气候特点与土壤墒情调控[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 203-206.
- [3] 张玉玲,张玉龙,黄毅,等. 辽西半干旱地区深松中耕对土壤养分及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 167-170.
- [4] 路钰. 辽宁省耕地土壤养分调查结果报告[J]. 杂粮作物, 2004, 24(3): 174-175.
- [5] 贺光. 辽宁省耕地土壤养分监测及变化评价[J]. 杂粮作物, 2001, 21(2): 36-38.
- [6] 黄毅,邹洪涛,虞娜,等. 辽西旱农区雨水资源跨时空调控技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 126-129.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [8] 刘孝义, 依艳丽. 土壤物理学基础及其研究法[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998.
- [9] 李文革, 李倩, 贺小香. 秸秆还田研究进展[J]. 湖南农业科学, 2006, (1): 46-48.
- [10] 冯国明. 秸秆还田方式及利弊分析[J]. 湖南农机, 2009, (5): 27

(上接第7页)

- [9] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. Eur J Agron, 2009, 31: 241-249.
- [10] Zhang S, Lovdahl L, Grip H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. Soil Tillage Res, 2009, 102: 76-86.
- [11] 程杰, 高亚军, 强秦. 渭北旱塬小麦不同栽培模式对土壤硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 104-110.
- [12] 王俊, 李凤民, 宋秋华. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205-210.
- [13] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 21-29.
- [14] 晋小军, 李国琴, 潘荣辉. 甘肃高寒阴湿地区地膜覆盖对马铃薯产量的影响[J]. 中国马铃薯, 2004, 18(4): 207-210.
- [15] 伍社生, 刘明月. 长沙地区春马铃薯不同栽培方式比较试验[J]. 中国马铃薯, 2006, 5(20): 265-269.
- [16] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agri Water Manage, 2009, 96: 374-382.
- [17] Zhang S, Lovdahl L, Grip H, et al. Modelling the effects of mulching and fallow cropping on water balance in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil Tillage Res, 2007, 93: 283-298.
- [18] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Res, 2009, 113: 41-47.
- [19] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- [20] 梁银丽, 党廷辉, 张成娥. 黄土高原农田生态系统生产力研究[M]. 西安: 陕西科学出版社, 2000.
- [21] 高世铭. 陇中黄土高原丘陵沟壑区生态环境建设与农业可持续发展研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.