

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2012.01504

免耕轮作对内蒙古地区农田贮水特性和作物产量的影响

郭晓霞 刘景辉* 田露 张星杰 李立军 张向前

内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019

摘要: 2005—2011年, 在内蒙古清水河县进行了免耕留高茬覆盖(NHS)、免耕留低茬覆盖(NLS)、免耕留高茬(NH)、免耕留低茬(NL)和常规耕作(T) 5种耕作方式与3种轮作模式(燕麦-大豆-玉米、大豆-玉米-燕麦和玉米-燕麦-大豆)对土壤贮水特性和作物产量影响的研究。结果表明, 不同免耕轮作处理中以免耕留茬覆盖结合燕麦-大豆-玉米轮作模式对土壤贮水量的提高程度最大, 增幅为常规耕作的35.66%~41.63%。不同免耕轮作模式均能提高作物水分利用效率和作物产量, 且作物产量高低与降雨量的变化趋势一致。第1个轮作周期后 NHS、NLS、NH 和 NL 分别较 T 作物水分利用效率增加43.77%、31.45%、26.74%和13.91%, 作物产量增加29.68%、27.69%、18.05%和15.66%。第2个轮作周期内由于干旱比较严重, 免耕方式结合燕麦-大豆-玉米模式效果较轮作第1个周期有所下降, 但 NHS、NLS、NH 和 NL 仍分别较 T 作物水分利用效率增加29.83%、20.51%、6.18%和3.15%, 作物产量增加17.52%、13.60%、4.33%和1.95%。因此, 在土壤水分基本来源于自然降水的内蒙古旱作区, 免耕轮作能够提高土壤蓄水保墒能力, 增加作物产量, 尤其以免耕秸秆覆盖结合燕麦-大豆-玉米模式效果最佳。

关键词: 免耕轮作; 土壤贮水量; 产量; 作物水分利用效率; 降雨量

Effects of No-Tillage with Rotation on Soil Water Retaining Properties and Crop Yield in Inner Mongolia

GUO Xiao-Xia, LIU Jing-Hui*, TIAN Lu, ZHANG Xing-Jie, LI Li-Jun, and ZHANG Xiang-Qian

Agronomy College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010019, China

Abstract: In 2005–2011, the effects of five tillage methods including no-tillage with high stubble mulching (NHS), no-tillage with low stubble mulching (NLS), no-tillage with high stubble (NH), no-tillage with low stubble (NL), and conventional tillage (T) combined with three rotation patterns (oat-soybean-corn, soybean-corn-oat, corn-oat-soybean) on water retaining properties and crop yield were studied in Qingshuihe county of Inner Mongolia. The results showed that no-tillage combined with rotations increased the soil water retaining capacity, and there was a positive correlation between soil water storage and rainfall. Among different treatments, the two no-tillage with stubble mulching combined with oat-soybean-corn rotation had the biggest effect to increase the soil water storage that was 35.66–41.63% higher as compared with conventional tillage. All the no-tillage methods combined with rotation patterns were able to increase crop water use efficiency and crop yield that was positively correlated with rainfall. After the first rotation cycle, compared with conventional tillage, the soil water use efficiency of NHS, NLS, NH, and NL increased by 43.77%, 31.45%, 26.74%, and 13.91%, the crop yield increased by 29.68%, 27.69%, 18.05%, and 15.66%. In the second rotation cycle, the drought was serious, which resulted in the decreased effects of no-tillage combined with oat-soybean-corn rotation, but the crop water use efficiency of NHS, NLS, NH and NL increased by 29.83%, 20.51%, 6.18%, and 3.15%, the crop yield increased by 17.52%, 13.60%, 4.33%, and 1.95%, as compared with conventional tillage. So in the arid area of Inner Mongolia where the rainfall is the major source of soil water, no-tillage combined with rotation can improve the ability of storing moisture in soil, and increase crop yield, especially the no-tillage with stubble mulching combined with oat-soybean-corn rotation.

Keywords: No-tillage with rotation; Soil water storage; Yield; Crop water use efficiency; Rainfall

本研究由 CGIAR 水和粮食挑战计划——黄河流域旱作保护性耕作项目(CPWFYRB200503), 内蒙古农业大学科技创新团队建设项目(NDTD2010-8)和中国农业大学与内蒙古农业大学两校合作基金项目资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 刘景辉, E-mail: cauljh@yahoo.com.cn, Tel: 0471-87281507

第一作者联系方式: E-mail: guoxiaoxia2008@126.com, Tel: 13739987792

Received(收稿日期): 2012-02-27; Accepted(接受日期): 2012-04-20; Published online(网络出版日期): 2012-06-04.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20120604.1004.004.html>

内蒙古黄土高原地区为中国古老的雨养农业区,由于侵蚀和干旱的影响,该地区粮食产量一般低于 2.0 t hm^{-2} ,为全国土壤生产力的低产水平^[1]。黄土高原土壤疏松多孔,有效含水量在12%~15%之间,持水孔隙可达25%~30%,具有极强的蒸发性能,保水能力差,且地下水埋藏较深,无上行补给的可能,降水成为该区域土壤水分的唯一补给来源。自然降水的大量流失和无效蒸发造成旱地作物产量低而不稳,如果能减少径流和蒸发等土壤水分的无效损失,便可显著提高作物的生产力水平和水分生产效率。

作物产量是一个系统管理水平与生产力的综合反映,也是衡量一种耕作方式和轮作模式好坏的主要标志之一^[2]。免耕等保护性耕作可以通过增加土壤肥力和养分有效性,提高水分利用率^[3],从而为作物生长创造良好的条件,使作物产量结构显著优化,有明显的增产效应^[4-5]。康红等^[6]通过5年的长期定位试验研究表明,免耕覆盖初期小麦产量显著降低,几年后产量呈上升趋势。免耕通过提高土壤根系活性,延缓地上部衰老,改善作物光合特性^[7-8],优化土壤水动态变化过程^[9],有助于土壤蓄水保墒,提高水分利用效率,促进作物生长发育^[10-11],从而提高作物产量。汪忠华等^[12]的研究表明,免耕秸秆覆盖种植小麦的增产幅度与降水天数、降水大小和两次降水最大间隔期等因素有关,在降水量小,降水天数少,2次降水最大间隔期大,日最大降水量大的气象条件下,其增产幅度较大,反之则较小。不同作物对水分、养分的需求与适应性不同,轮作可以充分利用土壤有利条件,对我国旱作雨养农业生产区提高产量具有重要的意义。休闲轮作具有良好的蓄水保墒作用^[13],不同轮作顺序提高了土壤表层含水量及土壤贮水量^[14],增加作物干物质质量,使作物产量及水分利用效率进一步提高。合理轮作是提高作物产量的一项经济有效的农业措施,国内外大量的生产实践和长期研究均表明,在农业生产过程中,轮作在提高作物产量上有着重要的作用,不需要增加过多的人力、物力,只是将作物合理轮作倒茬,便可获得较高的效益^[15]。免耕与轮作对土壤水分、作物产量影响的研究已取得一定成果,但长期免耕结合轮作对土壤贮水特性及作物产量影响的研究较少,也鲜见针对降雨波动性大的黄土高原雨养农业区的研究报道。

本研究在内蒙古黄土高原旱作区布设长期定位试验,将免耕与轮作相结合,探讨其对作物产量和

土壤贮水特性的影响机制,以期获得该地区适宜的节水增产免耕轮作模式,为改善干旱、半干旱地区生态环境、促进农业可持续发展提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

内蒙古清水河县(111°39'E, 39°57'N)的试验区水浇地不足2 000 km², 97%以上为梁坡旱地,属黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔1 374 m,年平均温度7.1℃,≥10℃积温2 370℃,无霜期140 d,年日照时数为2 914 h,年平均大风(指瞬间风速达17 m s⁻¹,即8级以上)日数达19 d,年总辐射量为570.6 kJ cm⁻²,年均降雨量365 mm,年蒸发量2 577 mm,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。

1.2 试验设计

2005—2011年,设免耕留高茬覆盖(NHS)、免耕留低茬覆盖(NLS)、免耕留高茬(NH)、免耕留低茬(NL)和常规耕作(T)5种耕作方式和A(燕麦-大豆-玉米)、B(大豆-玉米-燕麦)、C(玉米-燕麦-大豆)3种轮作模式,重复3次。T处理采用翻耕,分别于作物收获后和播种前各耕作1次,耕深15 cm左右;免耕处理在作物收获后至播种前,不搅动土壤,利用残茬和秸秆覆盖地表,采用中国农业大学研发的2MB-5型免耕播种机播种,留茬处理中高茬为20 cm,低茬为10 cm,覆盖处理在收获后以秸秆覆盖90%以上地表,秸秆覆盖量为4 500 kg hm⁻²。供试作物为玉米(哲单7号)、燕麦(雁红10号)、大豆(吉育47)。试验地土壤为栗褐土,土壤总孔隙度为43.65%,团聚体为118.8 g kg⁻¹,含有机质10.96 g kg⁻¹、全氮0.49 g kg⁻¹、全磷0.43 g kg⁻¹、碱解氮35.10 mg kg⁻¹、速效磷4.55 mg kg⁻¹、速效钾118.90 mg kg⁻¹。

1.3 测定方法

在作物生育时期内每间隔15~20 d采用铝盒烘干称重法测定一次1 m(0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm, 80~100 cm)深土层土壤含水量;同时在播前采用环刀法测定1 m(0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm, 80~100 cm)深土层土壤容重。土壤贮水量(W)=土壤重量含水量(%)×土壤容重(g cm⁻³)×土层厚度(cm)×10/100,单位是mm。

在播种前与收获后测定2次2 m(0~10 cm, 10~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm, 60~80 cm, 80~100 cm, 100~120 cm, 120~160 cm, 160~200 cm)土层土壤

含水量和土壤容重。作物水分利用效率 WUE ($\text{kg mm}^{-1} \text{hm}^{-2}$) = Y/ET , 式中, Y 表示单位面积作物产量 (kg hm^{-2}), ET (mm) 表示作物生长期间的蒸散量, $ET = P - \Delta S$, 其中 P 是作物生长期间的降雨量 (mm), ΔS 是收获期与播种期 0~200 cm 土壤贮水量之差 (mm)。

降雨量来自当地(清水河县)气象局提供的气象

资料。

1.4 数据分析

采用 SAS 9.0 软件进行试验数据的方差分析。

2 结果与分析

2.1 免耕轮作对作物产量的影响

由表 1 可知, 实施免耕的前 3 年, 作物产量不稳

表 1 免耕轮作对作物产量的影响
Table 1 Effects of no-tillage with rotation on crop yield (kg hm^{-2})

年份 Year	处理 Treatment	燕麦 Oat		大豆 Soybean		玉米 Corn	
		籽粒产量 Grain yield	秸秆产量 Straw yield	籽粒产量 Grain yield	秸秆产量 Straw yield	籽粒产量 Grain yield	秸秆产量 Straw yield
2005	No-tillage	1794.6 b	4002.0 b	582.4 b	873.6 b	4909.0 b	19636.0 b
	T	2217.8 a	4945.7 a	1008.2 a	1512.3 a	5432.0 a	21728.0 a
2006	NL	1701.9 e	3795.2 e	526.2 d	789.3 d	3761.7 e	15046.8 e
	NLS	1934.1 c	4313.0 c	562.8 c	844.2 c	4527.5 c	18110.0 c
	NHS	2020.8 b	4506.4 b	597.2 b	895.8 b	4633.4 b	18533.6 b
	NH	1817.3 d	4052.6 d	555.3 c	833.0 c	4014.5 d	16058.0 d
	T	2253.0 a	5024.2 a	1188.0 a	1782.0 a	4979.0 a	19916.0 a
2007	NL	2003.9 e	4468.7 e	1871.3 d	2807.0 e	4012.2 d	16048.8 d
	NLS	2276.8 b	5077.3 b	2019.3 b	3029.0 b	4769.7 a	19078.8 a
	NHS	2358.7 a	5259.9 a	2195.5 a	3293.3 a	4788.7 a	19154.8 a
	NH	2061.5 d	4597.1 d	2008.6 b	3012.9 c	4354.6 c	17418.4 c
	T	2167.8 c	4834.2 c	1954.6 c	2931.9 d	4541.3 b	18165.2 b
2008	NL	2113.9 c	4709.5 d	1881.9 d	2826.5 d	5409.7 d	21001.6 d
	NLS	2339.3 a	5221.8 b	2089.8 b	3139.0 b	5972.4 b	23895.3 b
	NHS	2384.8 a	5326.4 a	2211.1 a	3320.6 a	6065.8 a	24271.1 a
	NH	2168.4 b	4943.9 c	2010.1 c	3013.5 c	5521.9 c	21499.6 c
	T	1844.1 d	4106.3 e	1710.6 e	2551.9 e	4677.4 e	18701.3 e
2009	NL	1223.2 c	2727.7 c	409.1 d	613.7 c	3012.8 d	12051.2 e
	NLS	1297.6 b	2893.6 b	425.6 bc	638.4 b	3357.9 b	13431.6 c
	NHS	1316.8 b	2936.5 b	430.4 b	645.6 b	3396.4 b	13585.6 b
	NH	1237.0 c	2758.5 c	413.8 cd	620.7 c	3082.3 c	12329.2 d
	T	1481.4 a	3303.5 a	470.8 a	706.2 a	3825.1 a	15300.4 a
2010	NL	1342.6 c	2994.0 c	509.7 b	764.6 d	3201.5 c	12806.0 d
	NLS	1459.8 b	3255.4 b	521.8 b	782.7 c	3523.1 b	14092.4 b
	NHS	1491.6 ab	3326.3 a	536.9 a	805.4 b	3896.4 a	15585.6 a
	NH	1361.4 c	3035.9 c	513.2 b	769.8 d	3259.3 c	13037.2 c
	T	1502.3 a	3350.1 a	545.3 a	818.0 a	3923.6 a	15694.4 a
2011	NL	1936.4 c	4311.2 d	542.3 cd	810.4 d	4322.5 d	17282.3 d
	NLS	2256.9 b	5038.7 b	578.6 ab	869.3 b	4816.5 b	19271.5 b
	NHS	2310.6 a	5156.9 a	598.2 a	901.5 a	4982.3 a	19936.8 a
	NH	1971.2 c	4391.6 c	561.3 bc	840.2 c	4423.1 c	17691.3 c
	T	1852.3 d	4125.2 e	523.4 d	779.6 e	4239.7 e	16953.2 e

NL: 免耕留低茬; NLS: 免耕留低茬覆盖; NHS: 免耕留高茬覆盖; NH: 免耕留高茬; T: 常规耕作。表中同年同列内标以不同字母者在 0.05 水平上差异显著。

NL: no-tillage with low stubble; NLS: no-tillage with low stubble mulching; NHS: no-tillage with high stubble mulching; NH: no-tillage with high stubble; T: conventional tillage. Values followed by different letters within the same year and same column are significantly different at the 0.05 probability level.

定, 甚至减产, 第 4 年免耕增产效应有所显现, 总体表现为 $NHS > NLS > NH > NL > T$ 。以 2008 年籽粒产量为例, 在轮作 1 个周期后, 燕麦-大豆-玉米模式中, NL、NLS、NHS、NH 分别较 T 高 15.66%、27.69%、29.68%、18.05%; 大豆-玉米-燕麦模式中, NL、NLS、NHS、NH 分别较 T 高 14.63%、26.85%、29.32%、17.59%; 玉米-燕麦-大豆模式中, NL、NLS、NHS、NH 分别较 T 高 10.01%、22.17%、29.26%、17.51%。在第 2 个轮作周期开始时, 遇较严重干旱, 使 2009 年作物产量相对前一年大幅度下降, 并且表现为常规耕作大于免耕各处理, 说明在严重干旱的情况下, 免耕处理的产量相对常规耕作有减产效应。但随着降雨量的逐年增加, 免耕处理的作物产量呈增加趋势, 尤其是留茬覆盖 2 个处理。在第 2 个轮作周期后, NLS 和 NHS 的籽粒产量在燕麦-大豆-玉米、大豆-玉米-燕麦、玉米-燕麦-大豆 3 种轮作模式中分别较 T 提高 21.84% 和 24.74%、10.55% 和 14.29%、13.60% 和 17.52%。通过 5 种耕作方式结合 3 种轮作模式分别在 2 个轮作周期后的比较结果表明, 燕麦-大豆-玉米模式与免耕留茬覆盖处理相结合具有较好的增产效果。通过 2005—2011 年的试验可知, 3 种轮作模式结合免耕方式的秸秆产量变化趋势与籽粒产量一致。

2.2 降雨量对作物产量的影响

在干旱比较严重的年份, 土壤含水量的多少直接影响作物的产量, 同时在旱作区土壤含水量的多少主要依据当地降雨量的丰沛与否, 所以根据当地(清水河县)气象局的气象资料分析近 7 年内的降雨量可知, 降雨量对作物产量具有直接影响, 且降雨量的丰缺, 对不同的作物影响不同。由图 1 可知, 该

地区降雨强度和次数大部分集中在 7 月份以后, 且在播种后的两个月降雨量非常少, 月降雨量基本在 60 mm 以下, 而在 2009—2011 年间, 播种期的月降雨量均在 10 mm 左右, 可见干旱严重影响了作物的播种和出苗, 导致后期出现缺苗断垄的现象, 造成减产。2008 年当降雨量达到较高水平时, 且通过 4 年的免耕轮作处理对土壤质量的改善作用, 使土壤的蓄水保墒能力增强, 3 种作物的产量均较高; 而 2009 年是近几十年来最为干旱的一年(4 月、5 月、6 月和 7 月降雨量严重不足), 作物产量明显降低。在 NHS、NLS、NH、NL 和 T 5 个处理中, 燕麦产量较 2008 年分别降低 42.14%、44.53%、44.78%、42.95% 和 19.67%; 大豆产量分别降低 78.26%、79.63%、80.53%、79.41% 和 72.48%; 玉米产量分别降低 44.31%、43.78%、44.01%、44.18%、18.22%。可见在干旱比较严重的状况, 各处理作物产量均明显降低, 整体以免耕处理的作物产量降低幅度较大, 且低于常规耕作。

从以上分析可知, 在免耕条件下种植大豆的产量效果低于种燕麦和玉米。由图 2 可知, 2005—2011 年种植燕麦和玉米的产量变化随降雨量呈正相关关系。在实行免耕的前两年降雨量相对较高, 燕麦产量没有明显增加, 且常规耕作的产量高于免耕各处理, 说明在前两年降雨量基本能保证作物正常生长。之后随着耕作方式与轮作模式对土壤的改善作用, 土壤质量提高, 作物产量明显增加。但在 2009 年遇大旱, 土壤严重缺水, 造成产量直线下降。可见, 旱作区降雨量直接影响作物的生长发育, 最终表现在作物产量上。说明在旱作区通过不同耕作方式结合适宜的轮作模式增强土壤的蓄水保墒能力, 提高水分利用效率, 是一条行之有效的增产途径。

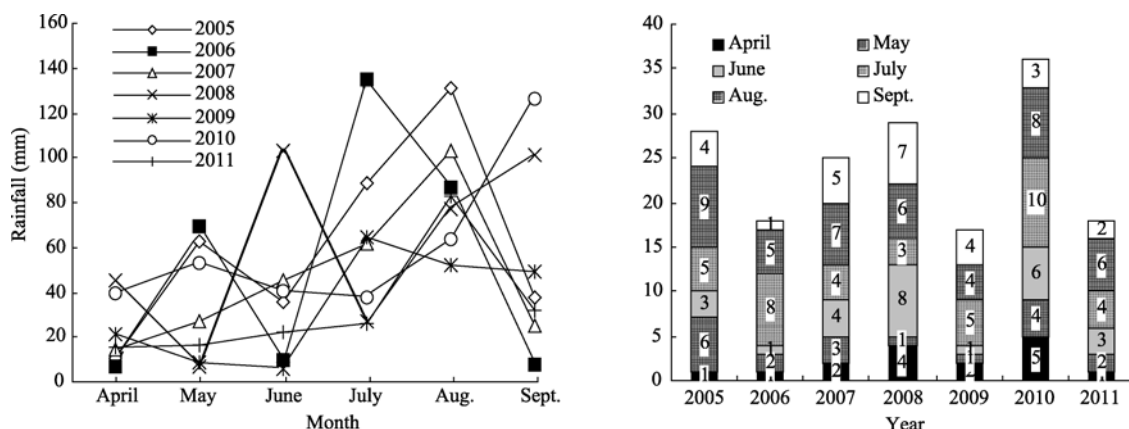


图 1 2005—2011 年间降雨量基本状况

Fig. 1 Rainfall in 2005-2011

右图图柱中的数字表示月降雨次数。

Numbers within the column in the right figure are the times of monthly rainfall.

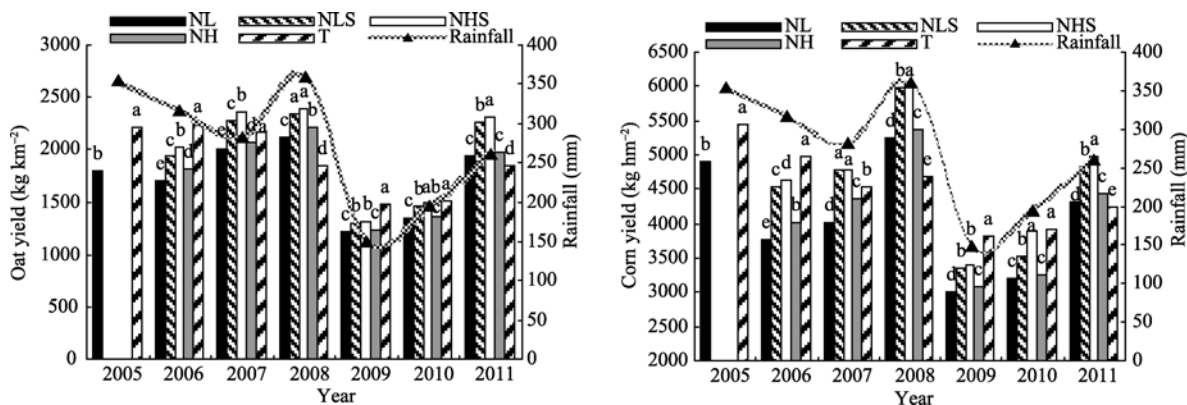


图 2 不同年际间降雨量与产量的关系

Fig. 2 Relationship between rainfall and crop yield in different years

NL: 免耕留低茬; NLS: 免耕留低茬覆盖; NHS: 免耕留高茬覆盖; NH: 免耕留高茬; T: 常规耕作。

图中标以不同字母者在 0.05 水平上差异显著。

NL: no-tillage with low stubble; NLS: no-tillage with low stubble mulching; NHS: no-tillage with high stubble mulching; NH: no-tillage with high stubble; T: conventional tillage. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level.

2.3 免耕轮作对生育时期 0~20 cm 土壤贮水量的影响

由图 3 和图 4 可知,无论是在水分相对充足的轮作第一个周期后,还是在相对干旱的轮作第 2 个周期后,土壤贮水量在 3 种轮作模式中,均以燕麦-大豆-玉米模式最高,其他 2 个差异不大。在 5 种耕作方式结合 3 种轮作模式中,土壤贮水量整体变化规律基本一致,均表现为 NHS>NLS>NH>NL>T。由于降雨量的差异,造成轮作第 1 个周期后土壤贮水量整体高于轮作第 2 个周期后。在整个生育时期土壤贮水量呈先降低再升高的变化趋势。免耕各处理增加了土壤的保水能力,土壤贮水量均显著高于常规耕作。在作物苗期以燕麦-大豆-玉米模式为例,轮作一个周期后 NHS、NLS、NH 和 NL 分别较 T 增

加 51.35%、50.79%、47.20%和 35.86%,而轮作 2 个周期后分别较 T 增加 16.24%、12.16%、8.75%和 5.56%,可见轮作一个周期后苗期土壤贮水量免耕各处理增加较高,这主要是当年 6 月份降雨量较大所致。

2.4 免耕轮作下 0~100 cm 土壤贮水量与降雨量的规律研究

由 2.3 节的研究结果可知,3 种轮作模式在 0~20 cm 土层土壤贮水量的整体变化趋势一致,且以燕麦-大豆-玉米模式对土壤贮水量的提高程度最大。因此本节以该模式为例分析不同年际间 0~100 cm 土壤贮水量的变化。由图 5 所示,土壤贮水量与降雨量呈正相关关系。在 2 个轮作周期内,土壤贮水量均表现为 NHS>NLS>NH>NL>T。在轮作第一个周

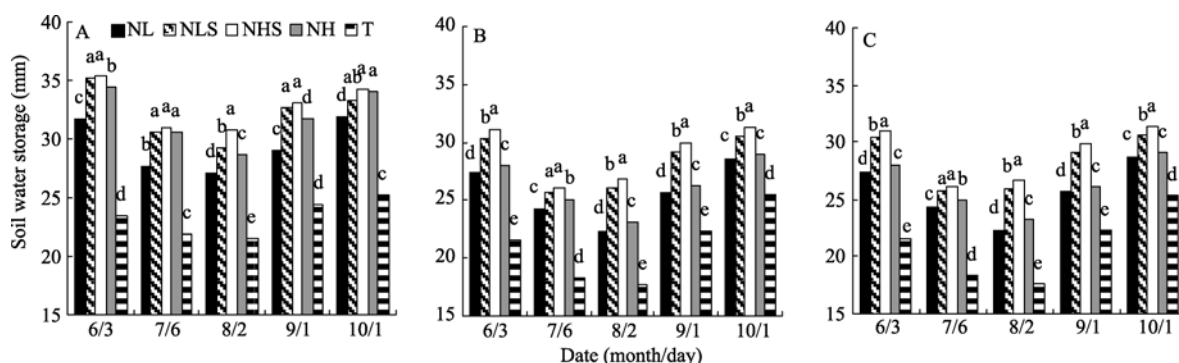


图 3 第 1 个轮作周期后土壤贮水量的变化

Fig. 3 Changes of soil water storage after the first rotation cycle

A: 燕麦-大豆-玉米; B: 大豆-玉米-燕麦; C: 玉米-燕麦-大豆; NL: 免耕留低茬; NLS: 免耕留低茬覆盖; NHS: 免耕留高茬覆盖; NH: 免耕留高茬; T: 常规耕作。图中标以不同字母者在 0.05 水平上差异显著。

A: oat-soybean-corn; B: soybean-corn-oat; C: corn-oat-soybean; NL: no-tillage with low stubble; NLS: no-tillage with low stubble mulching; NHS: no-tillage with high stubble mulching; NH: no-tillage with high stubble; T: conventional tillage. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level.

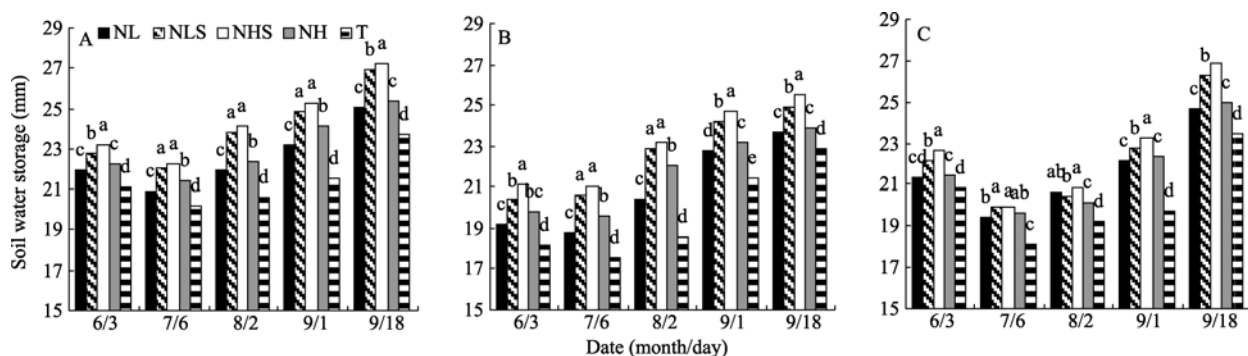


图 4 第 2 个轮作周期后土壤贮水量的变化

Fig. 4 Changes of soil water storage after the second rotation cycle

A: 燕麦-大豆-玉米; B: 大豆-玉米-燕麦; C: 玉米-燕麦-大豆; NL: 免耕留低茬; NLS: 免耕留低茬覆盖; NHS: 免耕留高茬覆盖; NH: 免耕留高茬; T: 常规耕作。图中标以不同字母者在 0.05 水平上差异显著。

A: oat-soybean-corn; B: soybean-corn-oat; C: corn-oat-soybean; NL: no-tillage with low stubble; NLS: no-tillage with low stubble mulching; NHS: no-tillage with high stubble mulching; NH: no-tillage with high stubble; T: conventional tillage. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level.

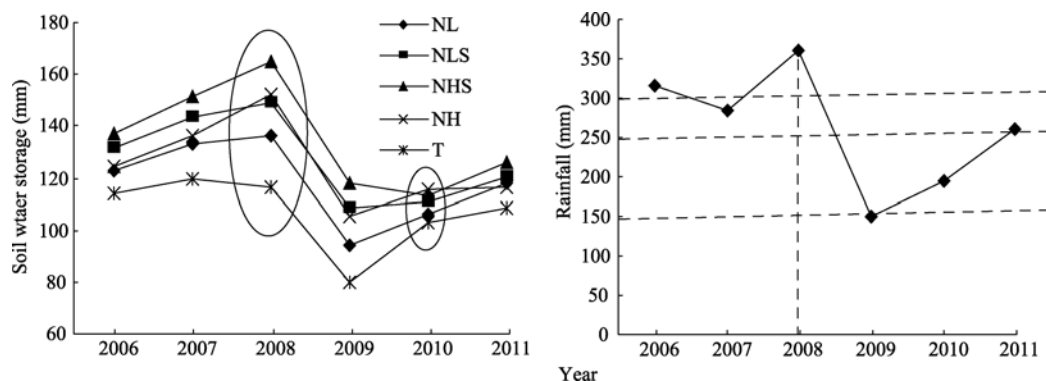


图 5 土壤贮水量与降雨量的年际变化

Fig. 5 Annual change of soil water storage and rainfall

NL: 免耕留低茬; NLS: 免耕留低茬覆盖; NHS: 免耕留高茬覆盖; NH: 免耕留高茬; T: 常规耕作。

NL: no-tillage with low stubble; NLS: no-tillage with low stubble mulching; NHS: no-tillage with high stubble mulching; NH: no-tillage with high stubble; T: conventional tillage.

期, 随着免耕轮作年限的增加, 不同处理播前 0~100 cm 土壤贮水量均逐年增加, 且处理间的差距逐渐增大, 尤其以留茬覆盖结合轮作的土壤贮水量增加幅度最大。与第 1 个轮作周期相比, 第 2 个轮作周期干旱比较严重, 土壤贮水量整体呈下降趋势。降雨量虽呈逐年增加趋势, 但较往年仍处于干旱状态, 导致 2009 年各处理间土壤贮水量差距逐渐减小, 到 2010 年不同处理间差距降到最低, 随着 2011 年降雨量持续升高, 土壤贮水量在各处理间的差距略有增加。

2.5 免耕轮作对作物水分利用效率的影响

由表 2 可知, 3 种作物的水分利用效率差异较大, 总体以玉米水分利用效率最高, 其次为燕麦, 大豆最低。免耕方式在作物水分利用效率上均表现为 NHS>NLS>NH>NL>T。以留高茬覆盖处理为例, 燕麦-大豆-玉米模式较大豆-玉米-燕麦模式和玉米-燕

麦-大豆模式轮作 1 个周期后作物水分利用效率分别增加 154.36% 和 174.41%, 轮作 2 个周期后分别增加 115.58% 和 731.29%。以燕麦-大豆-玉米模式为例, 在轮作 1 个周期后, NHS、NLS、NH 和 NL 分别较 T 作物水分利用效率增加 43.77%、31.45%、26.74% 和 13.91%。而轮作 2 个周期后分别增加 29.83%、20.51%、6.18% 和 3.15%。由此可见, 为提高该地区作物产量和经济效益, 免耕轮作模式是一条行之有效的途径。

3 讨论

耕作方式和轮作模式均直接影响作物的产量^[16-17], 国外的大量研究结果表明, 秸秆覆盖等耕作方式能有效地抑制土壤的棵间蒸发, 为作物的生长提供充足的水分条件, 通过缓解地温的急剧变化, 对作物的生长过程和产量非常有利^[18-21]。作物轮作

表 2 免耕轮作对作物水分利用效率的影响
Table 2 Effects of no-tillage with rotation on water use efficiency ($\text{kg mm}^{-1} \text{hm}^{-2}$)

作物 Crop	处理 Treatment	轮作 1 个周期 One rotation cycle			轮作 2 个周期 Two rotation cycles		
		2006	2007	2008	2009	2010	2011
燕麦 Oat	NL	5.78 e	8.12 c	6.32 c	9.29 c	7.88 c	8.23 c
	NLS	6.72 c	9.31 b	7.10 b	10.47 b	9.05 a	10.05 b
	NHS	7.27 b	10.06 a	7.80 a	11.18 a	9.25 a	10.72 a
	NH	6.15 d	8.25 c	7.22 b	9.39 c	8.11 c	8.42 c
	T	7.53 a	8.38 c	5.44 d	10.78 ab	8.71 b	7.77 d
大豆 Soybean	NL	1.79 c	7.58 c	5.63 c	3.11 b	2.99 d	2.30 cd
	NLS	1.95 bc	8.26 b	6.35 b	3.43 ab	3.23 ab	2.58 b
	NHS	2.15 b	9.36 a	7.23 a	3.66 a	3.33 a	2.78 a
	NH	1.88 c	8.04 bc	6.54 b	3.14 b	3.06 cd	2.40 c
	T	3.97 a	7.56 c	5.05 d	3.43 ab	3.16 bc	2.20 d
玉米 Corn	NL	12.78 d	16.26 d	15.72 d	22.88 d	18.79 e	18.36 d
	NLS	15.72 b	19.50 b	18.14 b	27.10 c	21.83 c	21.45 b
	NHS	16.67 a	20.42 a	19.84 a	28.85 a	24.17 a	23.11 a
	NH	13.58 c	17.43 c	17.49 c	23.40 d	19.43 d	18.90 c
	T	16.64 a	17.55 c	13.80 e	27.84 b	22.74 b	17.80 e

NL: 免耕留低茬; NLS: 免耕留低茬覆盖; NHS: 免耕留高茬覆盖; NH: 免耕留高茬; T: 常规耕作。表中同种作物同列内标以不同字母者在 0.05 水平上差异显著。

NL: no-tillage with low stubble; NLS: no-tillage with low stubble mulching; NHS: no-tillage with high stubble mulching; NH: no-tillage with high stubble; T: conventional tillage. Values followed by different letters within the same crop and same column are significantly different at the 0.05 probability level.

倒茬技术, 相对单一的种植模式优势明显, 它利用作物对环境水分、养分等生态因素需求差异, 进行作物间时序配置, 能改善土壤结构^[22-23], 平衡土壤养分^[24], 增加作物产量。

土壤贮水量是土壤重要的物理性质之一, 农田土壤贮水量及其变化的测定能够揭示农田土壤水分状态及其运动规律, 掌握作物的需水规律, 为当地作物需水情况提供定量依据。大量研究证实, 免耕具有显著的水土保持效应和作物增产效应, 但对土壤贮水量的影响程度会因地区、年份以及季节降雨量的不同而有所差异^[25]。杜冰等^[26]研究认为, 免耕和秸秆覆盖均能增加土壤贮水量, 使得地表状况改善、播种质量提高, 且不同年份播种前保护性耕作土层平均蓄水量比传统耕作平均增加约 9%。许迪等^[4]研究降水和灌溉对土壤水分的影响发现, 正常和干旱年份免耕土壤平均含水量较传统翻耕分别增加 7.1%和 15.4%。本研究表明, 燕麦-大豆-玉米免耕轮作模式对土壤贮水量的提高程度最大, 其他 2 种模式差异不明显。同时免耕轮作各处理土壤贮水量在不同时刻以及不同降雨条件下均高于常规耕作, 增幅为常规耕作土壤的 16.99%~41.63%, 各耕作处理的差异在降雨量较大情况下表现突出。可见适宜

的免耕轮作模式有利于提高土壤的蓄水保墒作用, 其贮水量随降雨量的增加而增大, 这对于提高内蒙古旱作区有限降雨资源的作物利用率具有积极意义。

关于免耕和轮作对作物产量的影响, 国内外学者的大量研究表明, 免耕和轮作可不同程度地提高作物产量^[10,12,15,27]。本研究结果表明, 2005—2011 年间作物产量, 在实施免耕轮作的前 3 年不稳定, 甚至减产, 这与部分前人的研究结果一致^[28-33]。轮作一个周期后, 免耕各处理增产效应明显, 尤其以燕麦-大豆-玉米模式结合免耕留茬覆盖的增产效果较好。但轮作第 2 个周期开始, 即实施免耕的第 5 年, 是近半个世纪以来最早的一年, 整个生育期降雨不足 140 mm, 尤其在播种后的 2 个月, 月均降雨量为 10 mm 左右, 最终导致免耕各处理较常规耕作减产, 但留茬覆盖处理由于前几年对土壤的改善作用, 作物产量依旧高于留茬不覆盖处理。原因为: (1)在降雨量较少的年份, 有限的降水大部分均被秸秆阻隔, 渗入土壤的水分明显减少^[34], 导致在干旱的情况下, 土壤含水量较常规耕作下降, 影响了作物产量。(2)土壤水热环境差, 秸秆不易腐烂^[35], 导致微生物活动下降, 土壤紧实, 影响作物的生长发育和吸收。因

此,在终年靠降雨来维持作物生长的内蒙古黄土高原旱作区,降雨量对作物产量有直接的影响,并且通过长期的免耕轮作可改善土壤,提高土壤蓄水保墒能力,增强土壤贮水性能,提高土壤贮水量,为干旱地区作物生长提供前提条件。

4 结论

在土壤水分基本来源于自然降水的内蒙古黄土高原旱作区,免耕轮作能够提高土壤蓄水保墒能力,增加作物产量,尤其以免耕秸秆覆盖结合燕麦-大豆-玉米模式效果最佳。

References

- [1] Zhu X-M(朱显谟). Soil and Agriculture on the Loess Plateau of China (黄土高原土壤与农业). Beijing: Agriculture Press, 1989. pp 36–53 (in Chinese)
- [2] Zhang Z-G(张志国), Xu Q(徐琪), Blevins R L. Influences of long-term mulched no-tillage treatment on some soil physical and chemical properties and corn yields. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 1998, 35(3): 384–391 (in Chinese with English abstract)
- [3] Xie R-Z(谢瑞芝), Li S-K(李少昆), Li X-J(李小君), Jin Y-Z(金亚征), Wang K-R(王克如), Chu Z-D(初震东), Gao S-J(高世菊). The analysis of conservation tillage in china-conservation tillage and crop production: reviewing the evidence. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, 40(9): 1914–1924 (in Chinese with English abstract)
- [4] Yang J(杨晶), Shen Y-Y(沈禹颖), Nan Z-B(南志标), Gao C-Y(高崇岳), Niu Y-N(牛伊宁), Wang X-Z(王先之), Luo C-Y(罗彩云), Li G-D(李光棣). Effects of conservation tillage on crop yield and carbon pool management index on top soil within a maize-wheat-soy rotation system in the Loess Plateau. *Acta Pratacult Sin* (草业学报), 2010, 19(1): 75–82 (in Chinese with English abstract)
- [5] Wu J(武际), Guo X-S(郭熙盛), Zhang X-M(张祥明), Wang Y-Q(王允青), Xu Z-Y(许征宇), Lu J-W(鲁剑巍). Effects of tillage patterns on crop yields and soil physicochemical properties in wheat-rice rotation system. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2012, 28(3): 87–93 (in Chinese with English abstract)
- [6] Kang H(康红), Zhu B-A(朱保安), Hong L-H(洪利辉). Effects of no-tillage with stubble mulching on soil fertility and wheat yield in arid area. *J Shaanxi Agric Sci* (陕西农业科学), 2001, (9): 1–3 (in Chinese)
- [7] Wang Y-R(王永锐), Li X-L(李小林). Study on root activity and leaf senescence of rice under no and minimum tillage. *Gengzuo yu Zaipei* (耕作与栽培), 1992, (4): 31–34 (in Chinese)
- [8] Wang F-H(王法宏), Wang X-Q(王旭清), Ren D-C(任得昌), Yu Z-W(于振文), Yu S-L(余松烈). Effect of soil deep tillage on root activity and vertical distribution. *Acta Agrci Nucl Sin* (核农学报), 2003, 17(1): 56–61 (in Chinese with English abstract)
- [9] Xu D(许迪), Schmid R, Mermoud A. Effects of tillage practices on the variation of soil moisture and the yield of summer maize. *Trans CSAE* (农业工程学报), 1999, 15(3): 101–106 (in Chinese with English abstract)
- [10] Yu Y-C(余泳昌), Liu X-W(刘晓文), Li M-Z(李明枝), Liang X-H(梁晓辉). Study on summer corn mechanization cultivating technology no-tillage drilling with mulching. *J Henan Agric Univ* (河南农业大学学报), 2002, 36(4): 309–312 (in Chinese with English abstract)
- [11] Fu G-Z(付国占), Li C-H(李潮海), Wang J-Z(王俊忠), Wang Z-L(王振林), Cao H-M(曹鸿鸣), Jiao N-Y(焦念元), Chen M-C(陈明灿). Effects of stubble mulch and tillage management on assimilating production and distribution in summer maize. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 2005, 20(3): 94–96 (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang Z-H(汪忠华), Chen S-Z(陈思哲). Effects of wheat straw cover on soil water and heat situation and maize yield. *Gengzuo yu Zaipei* (耕作与栽培), 1999, 5: 26–27 (in Chinese)
- [13] Ma Y-C(马月存), Qin H-L(秦红灵), Gao W-S(高旺盛), Chen Y-Q(陈源泉), Li X-D(李向东), Sui P(隋鹏), Huang F-Q(黄凤球). Dynamics of soil water content under different tillage in agriculture-pasture transition zone. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2007, 27(6): 2524–2530 (in Chinese with English abstract)
- [14] Guo Q-Y(郭清毅), Huang G-B(黄高宝), Guangdi Li, Yin Chan. Conservation tillage effects on soil moisture and water use efficiency of two phases rotation system with spring wheat and field pea in dryland. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 2005, 19(3): 165–169 (in Chinese with English abstract)
- [15] Cao W-X(曹卫星). General Crop Cultivation (作物学通论). Beijing: Higher Education Press, 2001. pp 300–302 (in Chinese)
- [16] Li L-L(李玲玲), Huang G-B(黄高宝), Qin S-H(秦舒浩), Yu A-Z(于爱忠). Effect of conservation tillage on dry matter accumulating and yield of winter wheat in oasis area. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2011, 37(3): 514–520 (in Chinese with English abstract)
- [17] Liu S-P(刘世平), Zhang H-C(张洪程), Dai Q-G(戴其根), Huo Z-Y(霍中洋), Xu K(许轲), Ruan H-F(阮慧芳). Effects of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, 16(2): 393–396 (in Chinese with English abstract)
- [18] Riley H C F, Bleken M, Abrahamsen S, Bergjord A K, Bakken A

- K. Effects of alternative tillage systems on soil quality and yield of spring cereals on silty clay loam and sandy loam soils in the cool, wet climate of central Norway. *Soil & Tillage Res*, 2005, 80: 79–93
- [19] Dam R F, Mehdi B B, Burgess M S E, Madramootoo C A, Mehuys G R, Callum I R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil & Tillage Res*, 2005, 84: 41–53
- [20] Ekeberg E, Riley H C F. Effects of mouldboard ploughing and direct planting on yield and nutrient uptake of potatoes in Norway. *Soil & Tillage Res*, 1996, 39: 131–142
- [21] Gupta R, Sethb A. A review of resource conserving technologies for sustainable management of the rice–wheat cropping systems of the Indo-Gangetic plains (IGP). *Crop Prot*, 2007, 26: 436–447
- [22] Li F R, Zhao S L, Geballe G T. Water use patterns and agronomic performance for some cropping systems with and without fallow crops in a semi-arid environment of northwest China. *Agric Ecosyst Environ*, 2000, 79: 129–142
- [23] Gouranga K, Verma H N, Ravender S. Effects of winter crop and supplemental irrigation on crop yield, water use efficiency and profitability in rainfed rice based cropping system of eastern India. *Agric Water Manag*, 2006, 79: 280–292
- [24] Dai S-R(戴树荣). Study on pattern of balance fertilization under peanut - sweet potato rotation. *Plant Nutr Fert Sci* (植物营养与肥料学报), 2003, 9(1): 123–125 (in Chinese with English abstract)
- [25] Peng W-Y(彭文英). Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency. *Chin J Soil Sci* (土壤通报), 2007, 38(2): 379–383 (in Chinese with English abstract)
- [26] Du B(杜兵), Deng J(邓健), Li W-Y(李问盈), Liao Z-X(廖植犀). Field experiments for comparison of winter wheat conservation tillage and conventional tillage. *J Chin Agric Univ* (中国农业大学学报), 2000, 5(2): 55–58 (in Chinese with English abstract)
- [27] Zhou S-P(周少平), Tan G-Y(谭广洋), Shen Y-Y(沈禹颖), Nan Z-B(南志标), Gao C-Y(高崇岳), Li G-D(李光棣), Yang J(杨晶). Dynamics of soil water and water use efficiency within maize-winter wheat-soybean rotation under different tillage treatments in the Longdong Loess Plateau. *Pratacult Sci* (草业科学), 2008, 25(7): 69–76 (in Chinese with English abstract)
- [28] Su Z Y, Zhang J S, Wu W L, Cai D X, Lv J J, Jiang G H, Huang J, Gao J, Hartmann R, Gabriels D. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. *Agric Water Manag*, 2007, 87: 307–314
- [29] Kirkegaard J A. A review of trends in wheat yield responses to conservation cropping in Australia. *Aust J Exp Agric*, 1995, 35: 835–848
- [30] Uri N D. Perceptions on the use of no-till farming in production agriculture in the United States: an analysis of survey results. *Agric Ecosyst Environ*, 2000, 77: 263–266
- [31] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? *Field Crops Res*, 2005, 94: 33–42
- [32] Koch H J, Stockfisch N. Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. *Soil & Tillage Res*, 2006, 86: 73–83
- [33] Tebrügge F, Düring R A. Reducing tillage intensity-a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Res*, 1999, 53: 15–28
- [34] Yao J(姚健), Wang D(王丁), Zhang X-S(张显松), Xue J-H(薛建辉). Effects of different types of mulches on soil moisture, temperature and seedling growth. *J Nanjing For Univ* (Nat Sci)(南京林业大学学报·自然科学版), 2009, 33(5): 7–11 (in Chinese with English abstract)
- [35] Zhang Y(张宇), Chen F(陈阜), Zhang H-L(张海林), Chen J-K(陈继康). Tillage effects of decomposed ratio on corn straw. *J Maize Sci* (玉米科学), 2009, 17(6): 68–73 (in Chinese with English abstract)