

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.00514

保护性耕作对绿洲灌区冬小麦产量形成的影响

李玲玲 黄高宝* 秦舒浩 于爱忠

甘肃省干旱生境作物学重点实验室 / 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070

摘 要: 2004—2007 年采用田间定位试验比较了传统耕作(T)、传统耕作+秸秆还田(TIS)、免耕不覆盖(NT)、免耕秸秆覆盖(NTS)和免耕立茬(NTSS)5 种耕作模式在甘肃河西绿洲灌区对冬小麦干物质积累、灌浆特性、产量构成因素及水分利用效率(WUE)的影响。结果表明, NTS 和 NTSS 延缓了冬小麦的生育进程, 延长了其灌浆持续期; NTS 及 NTSS 在冬小麦整个生长期都有最高的干物质积累量及相对生长率(RGR), 较高的主茎穗平均灌浆速率和小麦籽粒充实指数, 穗粒数和千粒重也较高, 最终表现为产量和 WUE 显著提高。与 T 相比较, 2004—2007 年 NTS 和 NTSS 平均产量分别提高 18.6%和 23.8%, 2005—2007 年 NTS、NTSS 平均 WUE 分别提高 26.8%和 16.1%。因此, 在沙尘暴发生频繁、水资源日益匮乏的甘肃河西灌区, 以免耕秸秆覆盖或免耕立茬的方式种植冬小麦是有利于小麦节水增产及农业可持续发展的种植方式。

关键词: 免耕秸秆覆盖; 免耕立茬; 冬小麦产量; 相对生长率; 灌浆特性; 水分利用效率

Effect of Conservation Tillage on Dry Matter Accumulating and Yield of Winter Wheat in Oasis Area

LI Ling-Ling, HUANG Gao-Bao*, QIN Shu-Hao, and YU Ai-Zhong

Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / Agronomy Faculty of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Hexi Oasis is the most important region for food crop production in Gansu province, where is not only exposed to serious wind erosion but also one of the main sources of dust storm in China. Spring wheat traditionally dominates in wheat production in this region, but the bare field from dry winter to spring usually accelerates serious wind erosion. Conservation tillage proves to be able to increase water use efficiency (WUE) and eliminate soil erosion. In this study, dry matter accumulating, yield and WUE of winter wheat under different tillage practices were investigated in order to establish proper systems of conservation tillage in the Hexi Oasis area for winter wheat production, and to save water and prevent wind erosion. Experiments on five tillage practices were carried out from 2004 to 2007, including conventional tillage (T), conventional tillage with stubble incorporated (TIS), no-tillage (NT), no-tillage with stubble retention (NTS), and no-tillage with stubble standing (NTSS). The effects of conservation tillage on dry matter dynamics, grain-filling characteristics, grain yield, yield components, and WUE of winter wheat were determined using wheat cultivar Fan-13. Compared with treatment T, the growth and development process and grain-filling duration of winter wheat were prolonged in NTS and NTSS treatments. Both treatments had higher values in dry matter, relative growth rate (RGR), grain-filling duration, average filling velocity in spike of main stem, and filling index than other treatments. Although the grain number per spike and 1000-grain weight of NTS and NTSS varied across years, they generally showed higher levels than those of the T and TIS treatments, especially the NTSS treatment. The highest WUE was observed in the NTS treatment. The average grain yields (2004–2007) of NTS and NTSS were increased by 18.6% and 23.8% compared to the T treatment, and the average WUE (2005–2007) of NTS and NTSS were enhanced by 26.8% and 16.1%, respectively. It is concluded that winter wheat cultivation with NTS or NTSS system could be applicable in Hexi Oasis area to obtain relative high yield and high WUE, and the field coverage with wheat seedlings during the winter could be propitious to controlling the frequency of dust storm in China.

Keywords: No-tillage with stubble retention; No-tillage with stubble standing; Yield of winter wheat; Relative growth rate; Characteristics of grain filling; Water use efficiency

本研究由国家自然科学基金项目(40771132), 国家科技支撑计划项目(2006BAD15B06), 甘肃省教育厅项目(0802-07), 教育部博士点基金(新教师类)(20106202120004)和甘肃省干旱生境作物学重点实验室开放基金资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 黄高宝, E-mail: huanggb@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: lill@gsau.edu.cn

Received(收稿日期): 2010-05-20; Accepted(接受日期): 2010-12-07.

甘肃河西绿洲地区深处内陆腹地, 水资源有限, 是甘肃省最主要的产粮区, 同时也是沙尘暴的重灾区和我国三大沙尘源区之一^[1]。该区目前在小麦生产上主要以春小麦为主, 由于春小麦生长期较短, 使土壤在一年中相当长时间处于裸露状态, 尤其是冬、春季节, 为沙尘暴的发生提供了很好的下垫面, 大大加剧了沙尘暴的发生频率及强度, 并增加了土壤水分的无效耗损^[2]。传统的小麦生产中, 作物播前收后多次翻耕耙耱, 作物秸秆全部移出农田, 以至于休闲季节地表裸露, 不仅使水分蒸发损失严重, 也加剧了冬春季的风蚀。因此, 亟待探索既有利于生态环境保护又有利于小麦节水增产的农艺措施。

冬小麦在干燥的冬春季以麦苗覆盖地表, 既可防止沙尘暴又可减少水分蒸发。因此在河西地区扩种冬小麦实现冬麦北移, 对改善生态脆弱区的生态环境具有重大的现实意义。保护性耕作是 20 世纪 30 年代美国发生黑风暴以后逐渐研究和发展起来的^[3-4], 是一种有利于土壤质量持续提高、减轻土壤侵蚀的新型耕作技术^[5-8]。保护性耕作通过地表覆盖、减少耕作对土壤的扰动, 可以蓄水保墒、减少水蚀和风蚀, 从而提高作物的产量和水分利用效率^[4], 在干旱、半干旱地区对改善生态环境、促进农业可持续发展有积极意义^[9]。因此, 将冬小麦种植与保护性耕作技术的应用相结合必将对河西灌区风蚀的防治和小麦产量和水分利用效率的提高起到重要作用。目前, 全球保护性耕作面积已经达到 1.06 亿公顷^[10], 而我国保护性耕作研究与应用起步较晚, 且集中在半干旱农区, 在干旱灌区较少, 尚未形成适合绿洲灌区的保护性耕作模式^[11], 也鲜见有关保护性耕作对作物产量形成影响的报道, 尤其是针对灌区作物产量的研究报道。

本研究在河西绿洲灌区布设长期定位试验, 将扩种冬小麦与保护性耕作技术研究相结合, 以期获得河西地区冬小麦防沙尘节水增产保护性耕作技术及其机制。该技术可显著降低农田土壤风蚀^[12], 降低蒸散量^[13-14], 增加冬小麦根系生物量^[15], 提高水分利用效率^[16-17]。本文重点研究该技术对冬小麦生

长特征、籽粒灌浆及产量等的影响, 旨在探索甘肃西部冬春麦交替区适宜的节水、防沙尘、增产的耕作模式, 以及为全国冬小麦北移和生态环境保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试区概况

试验于 2004 年 9 月至 2007 年 9 月在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学教学试验场进行。该区位于甘肃河西走廊东端, 属冷温带干旱区, 具典型的大陆性气候, 日照充足, 干燥少雨, 春季多风沙, 夏季有干热风。平均海拔 1 531 m, 年均降水量 160 mm 左右, 年蒸发量 1 919 mm, 干燥度 5.85, 全年无霜期 156 d, 绝对无霜期 118 d。年均大风日数 12 d, 年均沙尘暴日数为 9 d, 最多为 34 d。土壤为灌淤土, 其基础理化性状见表 1。

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为繁-13(张掖市农科所提供), 种子发芽率为 91.0%, 千粒重 50.99 g。采取随机区组设计, 5 个处理, 3 次重复, 共 15 个小区。小区面积为 26 m×4 m, 小区间距为 2 m, 区组间距为 3 m。采用甘肃农业大学工学院研制的免耕覆盖施肥播种机播种, 播种量为 337.5 kg hm⁻², 行距 15 cm, 播深 5 cm。施纯 N 192.0 kg hm⁻²、P₂O₅ 138.0 kg hm⁻², 折合磷酸二氢铵 300 kg hm⁻², 尿素 200 kg hm⁻²。全生育期灌 4 次水, 总灌水量为 4 950 m³ hm⁻²。第一次于冬前表层土壤夜冻昼消时灌入, 灌水量为 1 800 m³ hm⁻²; 于拔节、孕穗和灌浆期(开花后 2 周), 分别灌水 1 200、1 050 和 900 m³ hm⁻²。

设 5 种耕作方式处理, 分别是传统耕作(T)、传统耕作+秸秆还田(TIS)、免耕不覆盖(NT)、免耕+秸秆覆盖(NTS)、免耕+立茬(NTSS)。T 处理为前作收后深耕灭茬、立土晒垡、纳雨蓄墒、耙耱整平, 不覆盖; TIS 处理为传统耕作结合秋深耕, 将小区全部秸秆切为 5 cm 并还田; NT 处理为全年不耕作, 播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种, 收获后用 2,4-D 和草甘膦除草; NTS 处理的耕作方式及除草方

表 1 试验地土壤基本理化性状(2004 年)
Table 1 Basic physical and chemical properties of experimental soil in 2004

层次 Layer	速效氮 Available nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (mg kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)
0-10 cm	75.31	3.38	253.95	158	1.06
10-30 cm	53.53	2.73	232.21	156	1.10

法同 NT 处理, 但将收获的全部秸秆回还原小区; NTSS 处理是在前茬作物收获后免耕种植下茬作物, 前茬立秆留茬 25 cm。

1.3 测定指标及方法

每小区取样 15 株, 采取烘干法测定冬小麦干物质; 计算最大灌浆速率和平均灌浆速率, 并记录灌浆速率最大的时间^[18]。相对生长率 $RGR = [\ln(W_{t1}) - \ln(W_{t2})]/(t_2 - t_1)$ 。式中, W_{t1} 为时间 t_1 时的干物重, W_{t2} 为时间 t_2 时的干物重。充实指数 $= (W_{\max} - W_k)/(W_k - Y_{\max})$ 。式中, W_{\max} 为最大粒草干重, W_k 为成熟时粒草干重, Y_{\max} 为最大粒草干重时籽粒干重。充实指数越大说明干物质向籽粒运转能力越强。

采用烘干法测定 0~30 cm 土壤含水量; 用 503DR 型中子水分测定仪测定 30~150 cm 土层土壤含水量, 中子仪用烘干法校正。

按小区单收计产。水分利用效率 $WUE=Y/ET$ 。式中, Y 为籽粒产量, ET 为冬小麦全生育期耗水量, 根据水量平衡方程^[19], $ET = I + P - R_O - D_P + C_R \pm$

$\Delta S_F \pm \Delta S_W$ 。式中, I 为灌水量, 用水表计量, P 为降雨量, 用雨量器测定, R_O 表示地表径流, D_P 表示下边界排水量, C_R 表示地下浅水位水分通过毛细管向上运输的水量, ΔS_F 表示根区水分的水平运动, ΔS_W 表示土壤贮水量的变化。平坦土地的 R_O 与 ΔS_F 可以为 0, 试区地下水埋藏较深, 其补给量一般可以忽略不计, 即 $C_R = 0$, ΔS_W 根据播种、收获时的土壤含水量计算。本试验没有检测到下边界排水, 即 $D_P = 0$ 。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件分析数据, Sigma Plot 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对冬小麦生育进程的影响

与 T 处理相比, NTS 和 NTSS 模式下冬小麦生育进程延迟, 生育期分别延长 5 d 和 6 d, 灌浆时间推后 4 d 和 5 d (表 2)。生育期延长, 特别是灌浆时间延长有利于干物质的积累及其向籽粒转移。

表 2 不同耕作措施下冬小麦生育进程(2004—2005 年)

Table 2 Growing stages of winter wheat under different tillage practices in 2004—2005 (year/month/day)

处理 Treatment	播种期 Sowing	出苗期 Emergence	三叶期 Three-leaf stage	返青期 Regreening	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	开花期 Flowering	成熟期 Maturity
T	2004/9/20	2004/10/8	2004/10/13	2005/3/20	2005/5/4	2005/5/23	2005/5/31	2005/7/18
TIS	2004/9/20	2004/10/8	2004/10/18	2005/3/20	2005/5/4	2005/5/23	2005/5/31	2005/7/18
NT	2004/9/20	2004/10/8	2004/10/13	2005/3/20	2005/5/3	2005/5/23	2005/5/30	2005/7/19
NTS	2004/9/20	2004/10/8	2004/10/21	2005/3/22	2005/5/3	2005/5/26	2005/6/1	2005/7/23
NTSS	2004/9/20	2004/10/8	2004/10/19	2005/3/21	2005/5/4	2005/5/25	2005/6/1	2005/7/24

2.2 不同耕作措施对冬小麦干物质积累动态的影响

各处理冬小麦干物质积累态势均呈典型的“S”型曲线, 在拔节期以前, 各处理冬小麦干物质质量都较小, 且处理间差异不明显。拔节期以后, 表现出不同程度快速增长, 且处理间差异逐渐明显。NTS 干物质积累量始终高于其他处理, NT 和 NTSS 次之, 而 T 和 TIS 交替上升, 前期 T 高于 TIS, 而后期 TIS 高于 T (图 1)。这与 TIS 处理土壤 30 cm 以内埋有作物秸秆有关。各处理成熟期的干物质积累量均达高峰, 但年份间排序不同。总体上 2004—2005 年度单株干物质质量高于 2005—2006 年度, 其主要原因是 2004—2005 年度基本苗较少^[20]。

2004—2005 年度拔节~开花期的 RGR 大于 2005—2006 年度。NTS 和 NTSS 的 RGR 较其他处理高, NT 处理较低(表 3)。说明免耕结合秸秆覆盖或

立茬有利于冬小麦的生长, 而单纯的免耕对小麦生长发育不利, 这可能与免耕初期土壤温度偏低且无秸秆抑蒸保墒有关^[19, 21-22]。

2.3 冬小麦籽粒灌浆特性

不同耕作措施下冬小麦的籽粒增重过程均呈“S”型曲线, 与 Logistic 函数的拟合度达极显著相关, 处理之间存在明显差异。平均灌浆速率以 NTS 处理最高, 比 NT、TIS 和 T 处理分别高 2.26%、6.33% 和 32.0%。最大灌浆速率以 TIS 处理最高, 达 $3.688 \text{ mg plant}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 分别比 NT、T 和 NTS 高 19.36%、19.47% 和 33.95%。各处理最大灌浆速率出现在灌浆 15~18 d, 其中以 NTS 出现最早, 而 NT 最迟。各处理的充实指数与平均灌浆速率的趋势一致(表 4)。可见, 冬小麦籽粒饱满与否与平均灌浆速率密切相关, 也就是在灌浆期较高的平均灌浆速率有利于冬小麦籽粒增重, 而与最大灌浆速率关系不大。这与雨养农业区

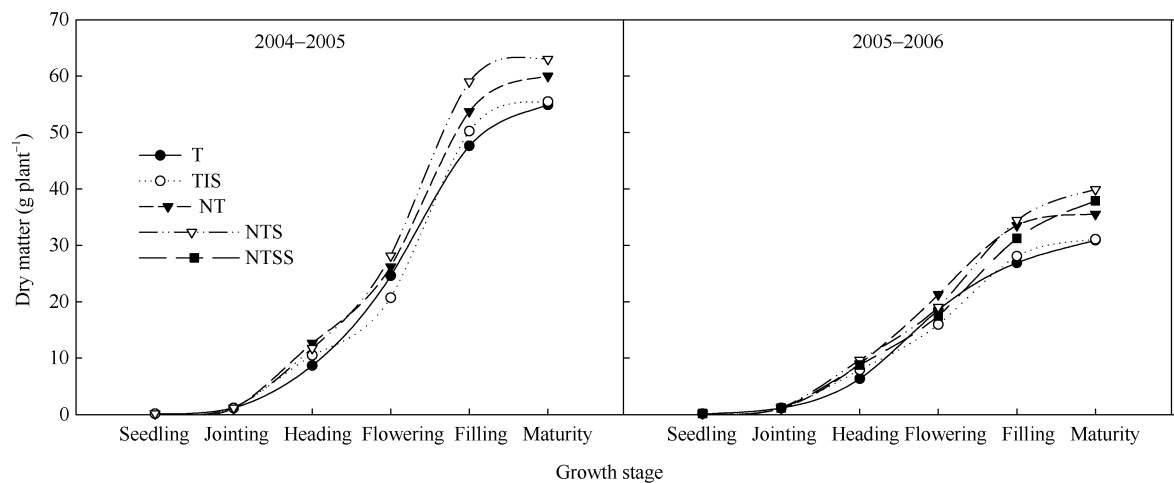


图 1 不同耕作模式处理冬小麦的干物质积累动态

Fig. 1 Dynamics of dry matter accumulation in winter wheat under different tillage practices
NTSS 处理 2004–2005 年数据缺失。In NTSS treatment, data in 2004–2005 growing season are not available.

表 3 不同处理各生育时期的相对生长率
Table 3 Relative growth rate of treatments at different stages

生育期 Growth duration (month/day)	T	TIS	NT	NTS	NTSS
2004–2005					
4/21–5/15	0.0952	0.0898	0.0824	0.0983	—
5/15–5/29	0.1341	0.1488	0.1525	0.1650	—
5/29–6/2	0.1605	0.1703	0.1810	0.2016	—
6/2–6/17	0.0441	0.0501	0.0493	0.0519	—
6/17–7/24	0.0032	0.0025	0.0019	0.0044	—
平均 Average	0.0874	0.0923	0.0934	0.1042	—
2005–2006					
4/18–5/3	0.1091	0.0843	0.0858	0.1201	0.1321
5/3–5/20	0.0700	0.0669	0.0642	0.0831	0.0880
5/20–6/5	0.0422	0.0491	0.0300	0.0492	0.0692
6/5–6/26	0.0277	0.0376	0.0176	0.0312	0.0252
6/26–7/19	0.0060	0.0044	0.0025	0.0064	0.0084
平均 Average	0.0510	0.0485	0.0400	0.0580	0.0646

拔节至开花期, 2004–2005 年度为 5 月 15 日—6 月 2 日, 2005–2006 年度为 5 月 3 日—6 月 5 日。数据为 3 次重复的平均值。“—”表示数据缺失。

Duration from jointing to anthesis was from 15 May to 2 June in the 2004–2005 growing season and 3 May to 5 June in the 2005–2006 growing season. Data are the means of three plots. “—” denotes data not available.

春小麦上的研究结果一致^[18]。

2.4 不同处理对冬小麦产量和 WUE 的影响

从 3 年的试验结果看, 总体上产量以 NTS 和 NTSS 处理最高, T 处理最低。与 T 相比较, TIS、NT、NTS 和 NTSS 的平均产量分别提高 9.06%、11.68%、18.56%和 23.81%, 与 T 处理之间差异达显著水平, 而 NTS 与 NTSS 间的差异不显著。分析产量构成因素, 每公顷穗数、穗粒数和千粒重在年度间存在显

著差异, 但总体上表现为 NTS 和 NTSS 的穗粒数和千粒重均较高(表 5)。

2005—2006 和 2006—2007 两个生长季的平均耗水量表现为 NTSS>NT>T>NTS>TIS。各处理 WUE 的差异与产量相似, 多年平均 WUE 以 NTS 最高, 但 NTS 与 NTSS 差异不显著(表 5)。因此, 不同耕作措施主要是通过影响穗粒数和千粒重而影响冬小麦产量和水分利用效率的, 但不同年份之间有差异。另

表 4 不同耕作措施冬小麦主茎穗籽粒灌浆特性(2004–2005 年)
Table 4 Filling properties of winter wheat under different tillage practices in 2004–2005

处理 Treatment	最大灌浆速率 V_{\max} of filling velocity (mg plant ⁻¹ d ⁻¹)	平均灌浆速率 Mean of filling velocity (mg plant ⁻¹ d ⁻¹)	速率最大的时间 Time to maximum velocity (d)	Logistic 方程 Logistic equation	相关系数 r	充实指数 Filling index
T	2.970	1.89 b	16.8	$Y = 5.7115 / (1 + e^{2.9150 - 0.1734t})$	0.9905**	1.13
TIS	3.688	2.07 a	15.8	$Y = 5.8014 / (1 + e^{2.7709 - 0.1751t})$	0.9983**	2.06
NT	2.974	2.16 a	17.6	$Y = 5.9949 / (1 + e^{2.8319 - 0.1607t})$	0.9986**	2.23
NTS	2.436	2.21 a	15.5	$Y = 5.1934 / (1 + e^{3.3485 - 0.2162t})$	0.9899**	2.25

数据为 3 次重复平均值, NTSS 处理数据缺失。 $r_{0.01,12} = 0.8340$, ** $P < 0.01$ 。

Data are the means of three plots. Data are not available in NTSS treatment. $r_{0.01,12} = 0.8340$, ** $P < 0.01$.

表 5 不同耕作措施冬小麦产量及水分利用效率
Table 5 Yield and water use efficiency of winter wheat under different tillage practices

处理 Treatment	每公顷穗数 Spike number ($\times 10^6$ hm ⁻²)	穗粒数 Grain number per spike	主茎穗粒重 Grain weight of main stem (g)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm ⁻²)	耗水量 Water consumption (mm)	水分利用效率 Water use efficiency (kg hm ⁻² mm ⁻¹)
2004–2005							
T	3.14 ab	28.15 b	1.73 ab	51.50 a	5461 ab	—	—
TIS	3.21 a	29.77 ab	1.63 c	51.70 a	5336 b	—	—
NT	3.01 b	28.95 b	1.73 ab	51.93 a	5150 b	—	—
NTS	3.28 a	30.29 a	1.74 a	52.07 a	5857 a	—	—
NTSS	—	—	—	—	—	—	—
2005–2006							
T	4.18 b	24.36 c	1.51 b	48.82 b	6061 b	551	11.0 b
TIS	4.58 ab	24.79 c	1.54 b	50.61 ab	7287 a	489	14.9 a
NT	5.33 a	25.65 b	1.45 c	51.12 a	7714 a	547	14.1 a
NTS	5.02 a	26.19 b	1.61 a	52.23 a	7915 a	528	15.0 a
NTSS	4.98 a	27.44 a	1.60 a	52.56 a	7535 a	558	13.5 a
2006–2007							
T	4.38 a	27.49 b	—	47.36 b	6533 b	578	11.30 b
TIS	4.41 a	27.93 b	—	50.19 ab	7067 ab	569	12.42 ab
NT	4.32 a	26.59 bc	—	50.80 ab	7300 ab	587	12.43 ab
NTS	4.28 a	30.91 a	—	51.08 a	7633 a	575	13.28 a
NTSS	4.78 a	29.26 ab	—	50.39 ab	7367 a	595	12.39 ab

数据为 3 次重复平均值, 均值后不同字母表示处理间存在显著差异($P < 0.05$)。“—”表示数据缺失。

Data are the means of three plots. Means followed by different letters are significantly different among treatments at $P < 0.05$. “—” denotes data not available.

外, 由于 NTS 的主茎穗平均灌浆速率高, 灌浆持续期较长, 所以其主茎穗粒重也较高, 这在一定程度上也间接地影响了产量和水分利用效率。

3 讨论

保护性耕作降低了土壤温度, 从而降低了作物早期的生长速率, 使生长状况及产量不如传统耕作^[23–24]。在河西绿洲灌区, 人口剧增、雪水退缩、地下水位下降及不合理的灌溉制度和土壤耕作方式, 不但使粮食生产面临挑战和土壤水分无效蒸发耗损

严重, 同时加剧了土壤结构破坏及环境条件的恶化^[2]。本研究表明, 免耕秸秆覆盖和免耕立茬冬小麦产量和 WUE 均显著提高。这可能与秸秆覆盖、立茬与免耕等保护性耕作措施使河西绿洲灌区农田蒸散量降低和土壤水分的增加效果更显著^[13–14]、冬小麦根系扩展范围大、吸收能力强^[15]等密切相关。

从产量形成过程看, 保护性耕作下冬小麦产量和 WUE 较高的机制主要是免耕秸秆覆盖和免耕立茬延缓了冬小麦的生育进程, 延长了其灌浆持续期, 提高了冬小麦主茎穗的平均灌浆速率, 增强了干物

质向籽粒运转的能力(充实指数), 提高了穗粒数和千粒重, 从而提高了冬小麦的籽粒产量和水分利用效率。陇中雨养农业区春小麦研究^[18], 小麦品种之间^[25]、不同水肥条件^[26-27]及不同种植模式^[28]等方面的研究也都发现了类似现象。可见, 主茎穗平均灌浆速率及灌浆持续期对小麦的产量具有较大的影响。

旱地研究结果认为, 少免耕、秸秆覆盖及少耕结合秸秆覆盖不仅可以蓄水保墒, 提高作物产量^[29-33], 还可以减轻水土流失、改善生态环境^[23-24]。在本研究中, 在河西春麦区种植冬小麦, 免耕立茬及免耕秸秆覆盖能够提高冬小麦产量和水分利用效率; 而且我们的研究还发现免耕秸秆覆盖和免耕立茬各土层的土壤含水量与土壤贮水量都不同程度地高于传统耕作^[16], 农田土壤风蚀显著降低^[12]。因此, 在河西绿洲灌区应用免耕秸秆覆盖或免耕立茬的方式种植冬小麦, 不仅可以增产、提高水分利用效率, 还可以防沙尘。

4 结论

在甘肃河西绿洲春麦区应用以免耕秸秆覆盖和免耕立茬为核心的保护性耕作技术种植冬小麦, 能够通过提高单株干物质积累量、冬小麦主茎穗平均灌浆速率, 延长灌浆持续期, 增强干物质向籽粒运转的能力, 提高穗粒数和千粒重, 从而提高冬小麦产量和水分利用效率。结合课题组相关研究认为, 在沙尘暴发生频繁、水资源日益匮乏的甘肃河西灌区, 以免耕秸秆覆盖或免耕立茬的方式种植冬小麦是有利于小麦节水增产及农业可持续发展的种植方式。

References

- [1] Kang E-S(康尔泗), Li X(李新), Zhang J-S(张济世). Water resources relating to desertification in the Hexi area of Gansu Province, China. *J Glaciol Geocryol* (冰川冻土), 2004, 12(6): 76-80 (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang Y-J(王亚军), Xie Z-K(谢忠奎), Tetsuo K, Lan N-J(兰念军). Research on variations of evapotranspiration and transpiration from spring wheat fields in Hexi oasis areas. *J Desert Res* (中国沙漠), 1999, 19(3): 272-275 (in Chinese with English abstract)
- [3] Worster D. Dust Bowl: The Southern Plains in the 1930s. New York: Oxford University Press, 1979
- [4] Uri N D. Conservation practices in US agriculture and their implication for global climate change. *Sci Total Environ*, 2000, 256: 23-38
- [5] Huang G-B(黄高宝), Luo Z-Z(罗珠珠), Xin P(辛平), Zhang G-S(张国盛). Effects of different tillage measures on infiltration characteristics in the semi-arid area of the west Loess Plateau. *Bull Soil Water Conserv* (水土保持通报), 2007, 27(6): 5-8 (in Chinese with English abstract)
- [6] Luo Z-Z(罗珠珠), Huang G-B(黄高宝), Zhang G-S(张国盛). Effects of conservation tillage on bulk density and water infiltration of surface soil in semi-arid area of western Loess Plateau. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2005, 23(4): 7-11 (in Chinese with English abstract)
- [7] Xin P(辛平), Huang G-B(黄高宝), Zhang G-S(张国盛), Deng Z(邓忠), Xu Y-P(徐银萍). Effects of different tillage methods on saturated hydraulic conductivity and soil strength of the surface soil. *J Gansu Agric Univ* (甘肃农业大学学报), 2005, 40(2): 203-207 (in Chinese with English abstract)
- [8] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil & Tillage Res*, 2002, 63: 133-139
- [9] Gan Y T, Huang G B, Li L L, Liu J H, Hu Y G. Unique conservation tillage practices in Northwest China. In: Goddard T, Zebisch M, Gan Y, Ellis W, Watson A, Sombatpanit S, eds. No-till Farming Systems. Bangkok, Thailand: World Association of Soil and Water Conservation (WASWC), 2008. pp 429-444
- [10] Kassam A, Friedrich T, Shaxson F, Pretty J. The spread of Conservation Agriculture: Justification, sustainability and uptake. *Intl J Agric Sustainability*, 2009, 7(4): 292-320
- [11] Gao H W, Li W Y. Chinese conservation tillage. In: International Soil Tillage Research Organization 16th Triennial Conference, Brisbane, Australia, 2003
- [12] Huang G-B(黄高宝), Yu A-Z(于爱忠), Yang R(杨荣), Guo Q-Y(郭清毅). Wind tunnel experiment on effect of conservative tillage in winter wheat fields on soil wind erosion in Hexi Corridor, Gansu Province. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), 2007, 44(6): 968-973 (in Chinese with English abstract)
- [13] Huang G-B(黄高宝), Qin S-H(秦舒浩). Effects of tillage practices on winter wheat field evapotranspiration characteristics at oasis area. *J Nat Res* (自然资源学报), 2007, 22(5): 793-799 (in Chinese with English abstract)
- [14] Qin S-H(秦舒浩), Huang G-B(黄高宝). Characteristics of winter wheat evapotranspiration and yield performance under different tillage practices in oasis-irrigated farmland. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2008, 16(3): 611-614 (in Chinese with English abstract)
- [15] Feng F-X(冯福学), Huang G-B(黄高宝), Chai Q(柴强), Yu A-Z(于爱忠), Qiao H-J(乔海军), Huang T(黄涛). Effects of different tillage on spatio temporal distribution of winter wheat root and yield. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2009, 29(5): 2499-2506 (in Chinese with English abstract)
- [16] Feng F-X(冯福学), Huang G-B(黄高宝), Yu A-Z(于爱忠), Chai Q(柴强), Tao M(陶明), Li J(李杰). Effects of different conservation tillage measures on winter wheat water use in Wuwei oasis irrigated area. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2009, 20(5): 1060-1065 (in Chinese with English abstract)
- [17] Yu A-Z(于爱忠), Huang G-B(黄高宝), Feng F-X(冯福学). The effect of different tillage on soil water and soil temperature of

- winter wheat field. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2009, 27(1): 84–88 (in Chinese with English abstract)
- [18] Qin S-H(秦舒浩), Li L-L(李玲玲). Accumulation and distribution of dry matter and grain filling of spring wheat postanthesis under supplementary irrigation catchments rainfall. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 2005, 19(4): 173–177 (in Chinese with English abstract)
- [19] Li K-Y(李开元), Li Y-S(李玉山). Study on field water balance of Loess Plateau. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 1995, 9(2): 39–44 (in Chinese with English abstract)
- [20] Qin S-H(秦舒浩). Effects of different tillage practices on evaporation, transpiration and water movement of winter wheat field in oasis area. PhD Dissertation of Gansu Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract)
- [21] Gong Y-S(龚元石), Li B-G(李保国). Sensibility of the Field water budget model to water extraction function by roots and evapotranspiration form. *Res Soil Water Conserv* (水土保持研究), 1996, 3(3): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- [22] Zhang B-L(张宝林), Chen F(陈阜). Availability of soil water under mulch tillage in Jinxi Highland. *Acta Agric Boreali-Sin* (华北农学报), 2005, 20(3): 57–61 (in Chinese with English abstract)
- [23] Singha G, Laryeab K B, Karwasrac S P. Tillage methods related to soil and water conservation in South Asia. *Soil & Tillage Res*, 1993, 27: 273–282
- [24] Moreno F, Pelegrín F, Fernández J E, Murillo J M. Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in Southern Spain. *Soil & Tillage Res*, 1997, 41: 25–42
- [25] Ren Z-L(任正隆), Li Y-Q(李尧权). Varietal differences of filling rate and relative growth rate of wheat grain and dry matter accumulation after anthesis in wheat. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1981, 14(6): 12–20 (in Chinese with English abstract)
- [26] Xie Z-J(谢祝捷), Jiang D(姜东), Cao W-X(曹卫星), Dai T-B(戴廷波), Jing Q(荆奇). Effects of plant growth regulation substances on photosynthetic characteristics and assimilates transportation in winter wheat under post-anthesis drought and Water logging. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(10): 1047–1052 (in Chinese with English abstract)
- [27] Li Z-Y(李志勇), Chen J-J(陈建军), Chen M-C(陈明灿). Effect of different nitrogen-fertilization managements on dry matter accumulation and water and nitrogen use efficiency in winter wheat. *J Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2005, 25(5): 80–83 (in Chinese with English abstract)
- [28] 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)
- [29] Huang G-B(黄高宝), Guo Q-Y(郭清毅), Zhang R-Z(张仁陟), Li G, Chan K Y. Soil water dynamics and crop productivity under conservation tillage on a two phases spring wheat-field pea rotation in rainfed area. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2006, 26(4): 170–180 (in Chinese with English abstract)
- [30] Huang G B, Li L L, Zhang R Z, Unkovich M, Li G, Chan K Y, Bellotti W. Conservation tillage research on the Loess Plateau of China. In: The 14th Australian Agronomy Conference, Adelaide, South Australia, 2008 (Global Issues, Paddock Action)
- [31] Li L-L(李玲玲), Huang G-B(黄高宝), Zhang R-Z(张仁陟), Jin X-J(晋小军), Li G, Chan K Y. Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 2005, 25(9): 2326–2332 (in Chinese with English abstract)
- [32] Li L-L(李玲玲), Huang G-B(黄高宝), Zhang R-Z(张仁陟), Jin X-J(晋小军), Li G, Chan K Y. Effects of no-till with stubble retention on soil water regimes in rainfed areas. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), 2005, 19(5): 94–97 (in Chinese with English abstract)
- [33] Huang G B, Zhang R Z, Li G, Li L L, Chan K Y, Heenan D P, Chen W, Unkovich M, Robertson M, Cullis B R, Bellotti W. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems. *Field Crops Res*, 2008, 107: 43–55