

干旱内陆灌区不同秸秆还田方式下 春小麦田土壤水分利用特征

殷文, 柴强, 胡发龙, 樊志龙, 范虹, 于爱忠, 赵财

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

摘要: 【目的】针对水资源短缺严重制约干旱绿洲灌区作物生产, 传统翻耕产量不稳定及水分利用效率低下等问题, 研究不同秸秆还田方式下春小麦农田土壤水分利用特征, 旨在优化耕作措施, 提高干旱内陆灌区农田的水分利用率。【方法】2014—2016年, 在河西绿洲灌区, 通过田间定位试验, 研究不同秸秆还田方式(少耕, 25—30 cm 秸秆高留茬立茬还田(NTSS); 少耕, 25—30 cm 秸秆高留茬覆盖还田(NTS); 翻耕, 25—30 cm 秸秆高留茬还田(TS); 传统翻耕, 无秸秆还田(CT))对春小麦田水分利用的时间动态、耗水结构以及利用效率的影响, 以期优化试区春小麦高产高效栽培管理技术提供理论依据。【结果】少耕秸秆还田可降低春小麦田耗水量, 与CT相比, NTSS、NTS分别降低3.1%—7.8%与3.7%—7.7%; NTSS、NTS通过减少春小麦生育前期(灌浆期之前)的耗水, 增大生育后期(灌浆初期至成熟期)的耗水量, 有效协调春小麦前后生育时期需水矛盾, 相比NTSS, NTS处理的调控效应更突出。少耕秸秆还田具有抑制土壤蒸发, 减小棵间蒸发占总耗水量(E/ET)的比重, 提高水分利用有效性的作用, NTSS、NTS较CT棵间蒸发量分别降低9.3%—17.4%、10.8%—23.3%, 较TS分别降低4.0%—5.8%与5.6%—11.4%, 以NTS降低棵间蒸发量幅度较大, 因而NTS较CT处理E/ET降低6.9%—21.3%。秸秆还田具有增产优势, 与CT相比, NTSS、NTS、TS分别增产16.6%—24.9%、18.6%—27.3%、10.2%—18.7%, 3个秸秆还田处理中, NTSS、NTS较TS分别增产5.2%—5.9%、7.2%—9.5%。因而, 秸秆还田处理具体较高的水分利用效率, NTSS、NTS、TS较CT处理水分利用效率分别提高21.1%—28.3%、26.6%—30.6%、13.1%—20.3%, 以NTSS、NTS提高比较大, 比TS分别提高6.7%—11.9%、8.6%—13.7%。【结论】在水资源短缺的河西绿洲灌区, 集成应用少耕与25—30 cm 秸秆立茬及覆盖还田技术是实现春小麦高产、稳产、灌溉水高效利用的理想耕作措施。

关键词: 秸秆还田; 耕作措施; 耗水特性; 产量; 水分利用效率; 春小麦

Characteristics of Soil Water Utilization in Spring Wheat Field with Different Straw Retention Approaches in Dry Inland Irrigation Areas

YIN Wen, CHAI Qiang, HU FaLong, FAN ZhiLong, FAN Hong, YU AiZhong, ZHAO Cai

(College of Agronomy, Gansu Agricultural University/Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070)

Abstract: 【Objective】In oasis irrigated agricultural region, water resources scarcity is one of the most prominent constraints for crop production, which also leads to the unstable yield and the lower water use efficiency of crop production with conventional tillage. In this study, the characteristics of soil water utilization in spring wheat field with different straw retention approaches were investigated in the areas, so as to optimize the farming practices and to improve the water use efficiency. 【Method】A field experiment was carried out in a typical oasis irrigation region, Wuwei, Gansu Province, from 2014 to 2016, to determine the effects of treatments of straw retention patterns on soil water utilization of spring wheat field. The treatments included reduced tillage with

收稿日期: 2018-09-06; 接受日期: 2018-10-29

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503125-3)、甘肃农业大学人才专项经费(2017RCZX-02)

联系方式: 殷文, E-mail: yinwen@gsau.edu.cn. 通信作者柴强, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

25 to 30 cm high straw standing (NTSS), reduced tillage with 25 to 30 cm high straw covering (NTS), conventional tillage with 25 to 30 cm high straw incorporation (TS), and conventional tillage without straw retention (CT, the control). 【Result】 Reduced tillage with straw retention could decrease evapotranspiration of spring wheat field, furthermore NTSS and NTS treatments decreased evapotranspiration by 3.1% to 7.8%, 3.7% to 7.7%, compared to CT treatment, respectively. NTSS and NTS treatments decreased evapotranspiration of wheat before early-filling stage but increased it afterwards, so this created a more optimal balance between early- and late-stage water demand of spring wheat. NTSS and NTS treatments could enhance the effectiveness of water by inhibiting soil evaporation and reducing the proportion of evaporation to evapotranspiration (E/ET) for the spring wheat field. NTSS and NTS treatments reduced soil evaporation by 9.3% to 17.4% and 10.8% to 23.3% over CT treatment, and reduced by 4.0% to 5.8% and 5.6% to 11.4% over TS treatment, respectively. Among the two reduced tillage with straw retention treatments, NTS had the best effect on inhibiting soil evaporation, thus this treatment reduced E/ET by 6.9% to 21.3%. The grain yield of NTSS, NTS, TS was 16.6% to 24.9%, 18.6% to 27.3%, 10.2% to 18.7% greater than that of CT treatment, respectively, among the three straw retention treatments, NTSS and NTS had greater grain yield by 5.2% to 5.9% and 7.2% to 9.5% than that of TS treatment, respectively. Thus, straw retention treatments had greater water use efficiency (WUE), compared to CT treatment, NTSS, NTS, and TS treatments improved WUE by 21.1% to 28.3%, 26.6% to 30.6%, 13.1% to 20.3%, respectively. Across the three straw retention treatments, NTSS and NTS treatments improved WUE by 6.7% to 11.9%, 8.6% to 13.7%, in comparison to TS treatment, respectively.

【Conclusion】 Our results showed that reduced tillage in combination with 25 to 30 cm high straw standing and covering was the feasible technology for realizing high yield, stable yield and efficient utilization of irrigation water of spring wheat production in the oasis irrigation region.

Key words: straw retention; tillage practice; water consumption characteristics; yield; water use efficiency; spring wheat

0 引言

【研究意义】土壤水分是作物生长发育及产量形成的关键限制因子,受土壤耕作方式^[1]、覆盖措施^[2]及种植方式^[3]等因素影响,作物群体水分利用状况与其光合同化物累积、分配、产量形成密切相关^[4]。而栽培措施是调控作物群体生长发育的重要途径^[2],优化栽培措施,改善作物耗水特性,是提高水分利用效率的主要途径。研究特定栽培措施对土壤水分利用特性的影响,不仅是提高自然资源利用效率的重大需求,同时可为优化作物综合生产技术体系提供重要依据。因此,在资源性缺水地区,研发作物高产高效栽培技术具有重要意义。

【前人研究进展】耕作措施、地表覆盖作为调控农田土壤水分环境的主要措施,可通过改善土壤蓄水供肥能力、增加土壤渗透性,实现土壤扩蓄增容^[5-6],具有可操作性强、简捷等优点^[7]。其中,秸秆还田具有抑制土壤蒸发、保墒蓄水、调节地温、提高肥力等多种优点^[7-8],但也存在降低作物生长前期表层土壤温度,延缓出苗等缺点^[9]。前人研究表明,长期单一免耕土壤压实程度加重,干土体积质量增加,土壤水分无效蒸发严重,不利于作物根系发育,显著降低产量^[10-11]。旱作条件下,免耕结合秸秆覆盖可为作物生长创造良好的土壤结构条件,促进作物根系发育和土壤微生物活性,抑制土壤蒸发加强作物有效蒸腾耗水而提高作物产量和水分利用效率^[12-13]。【本研究切入点】在灌溉农业区,集成少免

耕、秸秆还田技术,能否通过秸秆还田的低温保墒效应,降低作物生育前期土壤水分无效蒸发,增加生育后期作物的有效蒸腾,使无效耗水转化为有效耗水,通过优化作物耗水特性而提高作物产量与水分利用效率的潜力尚未被挖掘。【拟解决的关键问题】本研究在干旱绿洲灌区,将少耕与秸秆还田技术同步集成在春小麦栽培模式中,有望通过优化耗水特性,提高春小麦生育期水分需求与农艺调控效应间的吻合度。阐明不同秸秆还田方式对土壤水分利用的调控机理,建立适用于绿洲灌区春小麦高效生产的秸秆还田技术,从而为试区土壤耕作技术的改进和作物高产、高效栽培提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于 2014—2016 年度在甘肃农业大学绿洲农业综合试验站(37°30' N, 103°5' E)实施。试验站位于甘肃河西走廊东端,属寒温带干旱气候区,多年平均降水低于 200 mm、年蒸发量大于 2 000 mm,灌溉水资源有限,作物种植须采用地膜覆盖、秸秆还田等高效简易节水措施。试验地土壤为砂壤土,0—30 cm 耕层土壤容重 1.53 g·cm⁻³,含有机质 14.30 g·kg⁻¹、全氮 0.67 g·kg⁻¹、全磷 1.42 g·kg⁻¹、铵态氮 1.87 mg·kg⁻¹、硝态氮 12.51 mg·kg⁻¹。3 个试验年份,春小麦生育期内降雨量如表 1。

表 1 不同年份春小麦生育期内不同月份降雨量
Table 1 The precipitation across various month of spring wheat growing period in the testing years (mm)

年份 Year	月份 Month					
	三月 March	四月 April	五月 May	六月 June	七月 July	春小麦全生育期 Entire growing period of spring wheat
2014	0.3	19.6	17.9	23.7	39.4	100.9
2015	0	16.0	18.6	39.5	34.6	108.7
2016	0	19.3	23.2	33.2	31.2	106.9

1.2 试验设计

2013 年布设预备试验，在当季春小麦收获时为翌年试验所需建立 4 种秸秆还田方式，即春小麦 25—30 cm 秸秆高留茬立茬免耕；25—30 cm 秸秆高留茬覆盖免耕；25—30 cm 秸秆高留茬翻耕；传统低茬收割翻耕，次年施基肥、旋耕（少耕）、耙耱后播种春小麦。形成 4 个处理，分别是少耕、25—30 cm 秸秆高留茬立茬还田（NTSS）；少耕、25—30 cm 秸秆高留茬覆盖还田（NTS）；翻耕、25—30 cm 秸秆高留茬还田（TS）；传统低茬收割翻耕（CT）。秸秆还田处理全年实施且还田量约为 4 200 kg·hm⁻²。各处理 3 次重复，共 12 个小区，小区面积 48 m²，田间随机区组排列。

3 个试验年度（2014—2016 年），春小麦播种日期分别为 3 月 21 日、3 月 29 日、3 月 30 日，收获日期分别为 7 月 24 日、7 月 28 日、7 月 21 日。供试春小麦（*Triticum aestivum* L.）品种为宁春 2 号。播种密度为 675 万粒/ hm²。

灌溉及施肥制度同当地高产田，即灌溉制度为冬灌水 120 mm，春小麦生育期内，按苗期、孕穗期、灌浆期分别补灌 75、90、75 mm。所有处理施肥量一致，氮肥为尿素，磷肥为磷酸二铵，施 225 kgN·hm⁻²，150 kg P₂O₅·hm⁻²，全作基肥。

1.3 测定指标和计算方法

土壤含水量：0—30 cm 土层每 10 cm 为一层，采用烘干法测定；30—120 cm 土层采用水分中子仪（NMM503DR，CA，USA）测定，按 30 cm 为一层。春小麦播种前和收获后各测定一次，生育期内每约 15 d 测定一次，灌水前后分别加测一次。中子水分仪测定值与土壤含水量的拟合曲线如下：

$$\theta = (0.4023 \times \frac{R}{R_0} + 0.0031) \times 100\% ; R^2 = 0.9828$$

式中， θ 为土壤质量含水量， R 为中子水分仪的实际测定值， R_0 为中子水分仪基础数值。

土壤贮水量：
$$SWS = \sum_{i=1}^6 h \times a \times \theta \times 10$$

式中， SWS 为土壤贮水量（mm）； h 为土层厚度（cm）； a 为土壤容重（g·cm⁻³）， θ 为土壤质量含水量，10 为单位换算系数。

作物耗水量（ ET ）及耗水模系数（ CP ）：采用农田水分平衡法计算^[14]。由于试区水资源短缺，节水灌溉灌水量相对较小，土层深度为 1.2 m，试验小区平整且试区地下水埋深在 30 m 以下，故忽略了渗漏量和地下上升水的影响。因此，作物耗水量、阶段耗水量的计算方程为： $ET_i = P_i + I_i - \Delta S_i$ 。式中， ET_i 为 i 时段作物耗水量； P_i 为 i 阶段的降水量； I_i 为 i 阶段灌水量； ΔS_i 为 i 时段末与时段初的土壤贮水量之差，单位为 mm。

耗水模系数（ CP ）= 各生育阶段耗水量/作物全生育期耗水量。

棵间蒸发量：采用微型蒸渗仪（Micro-lysimeter，ML，高 15 cm，直径 11 cm）自小麦出苗后至收获前每隔 3—5 d 测定，每小区安装 1 个微型蒸渗仪，土壤蒸发量为两次测量值间的差值，微型蒸发器中土样每降低 1 g 相当于蒸发水分 0.1051 mm。为保证 ML 内土体水分含量和结构与大田相似，每隔 3—5 d 更换器内的原状土体，并且在下雨或灌水后加测。

蒸散比（ E/ET ）：全生育期蒸散比为全生育期棵间蒸发量（ E ）与总耗水量（ ET ）之比；各生育阶段蒸散比为某生育阶段棵间蒸发量（ E ）与该生育阶段耗水量（ ET ）之比。

水分利用效率（ WUE ）： $WUE = Y/ET$

式中， Y 为春小麦籽粒产量（kg·hm⁻²）； ET 为春小麦全生育期耗水量（mm）。

1.4 数据统计

数据采用 Microsoft Excel 2016 整理、汇总及图表绘制，利用 SPSS 17.0 软件进行方差分析。因为本研究属于田间定位试验，年份（时间）会对试验结果产

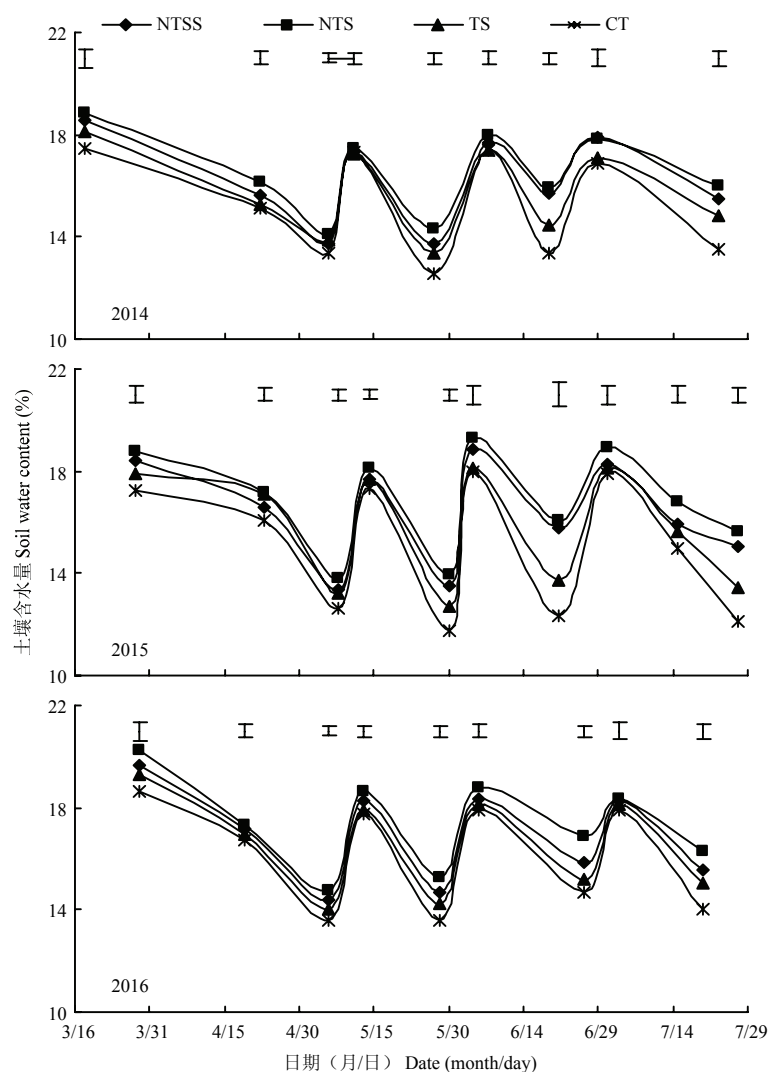
生重大影响,即不同秸秆还田方式与年份之间会有交互效应,因此,本研究以年份(时间)作为一个因子,把文中测定数据进行重复测量方差分析,即采用 two-way repeated measures ANOVA (二因子重复测量方差分析)进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 不同秸秆还田方式下春小麦农田土壤含水量差异

2.1.1 全生育期土壤含水量动态 不同秸秆还田方式下春小麦农田 0—120 cm 土层土壤含水量在 3 个试验年度处理间差异均显著,且土壤含水量随灌溉及作物生育进程而有差异(图 1)。秸秆还田具有提高春小麦播种时土壤含水量的优势,少耕秸秆还田处理

(NTSS、NTS)较传统耕作无秸秆还田(CT)土壤含水量分别提高 5.4%—6.9%、8.2%—9.0%,翻耕秸秆还田(TS)比 CT 提高 3.4%—4.0%。播种至拔节期,随着时间的推进,土壤含水量依次降低,3 个试验年度 NTS 较 CT 提高土壤含水量为 5.8%—8.0%。春小麦拔节期之后灌水使得土壤含水量急剧增大,至春小麦孕穗期出现低谷,这一生育时期,NTSS、NTS、TS 较 CT 土壤含水量分别提高 7.9%—15.0%、12.3%—19.0%、4.7%—8.3%,3 个秸秆还田处理以 NTS 提高比例较大,比 TS 高 6.7%—9.9%。孕穗期补灌各处理获得较高的土壤含水量使得差异不显著,至开花期各处理土壤含水量均较低,此时 NTSS、NTS、TS 较 CT 处理土壤含水量分别提高 8.4%—28.1%、15.4%—



图上的误差线表示 LSD 值。下同 Error bars above the curves indicate the value of LSD in the figure. The same as below

图 1 不同秸秆还田方式下春小麦农田 0—120 cm 土层平均土壤含水量动态

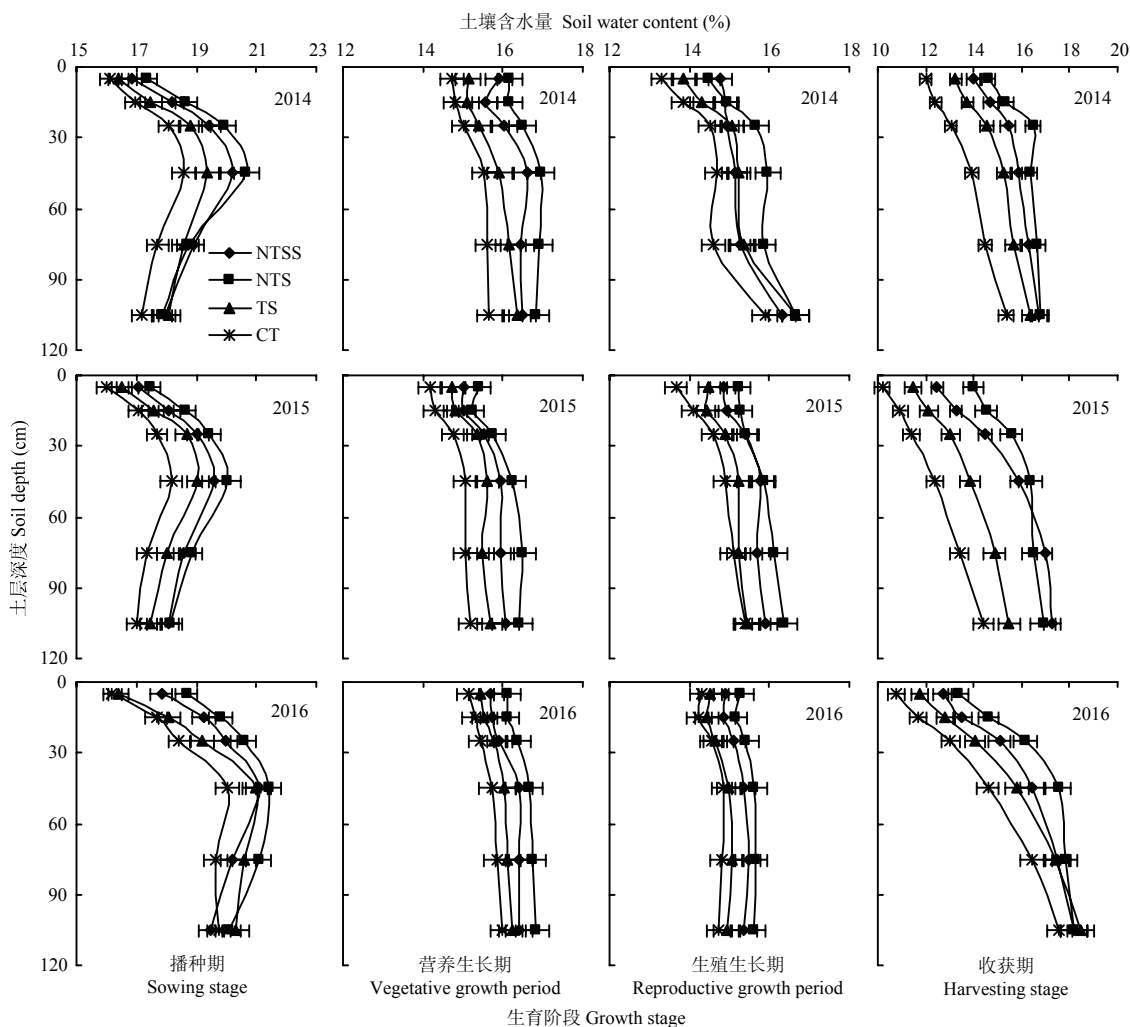
Fig. 1 Dynamics of soil water content at 0-120 cm soil layer of spring wheat field with different straw retention approaches

30.6%、4.6%—11.2%，NTSS、NTS 较 CT 提高比例分别为 4.6%—15.2%、10.1%—17.4%。春小麦灌浆初期补灌提高各处理土壤水分含量至收获期而降低，此时 NTSS、NTS、TS 较 CT 土壤含水量分别提高 11.1%—21.1%、16.2%—29.0%、7.4%—11.1%，NTSS、NTS 较 CT 分别提高 4.8%—11.7%、8.2%—16.1%。

纵观全生育期内 0—120 cm 土层平均土壤含水量而言，NTSS、NTS 较对照 CT 土壤含水量分别提高 5.1%—8.8%、8.1%—12.2%，以 NTS 提高土壤水分

含量幅度较大，比 TS 高 4.8%—7.0%。说明少耕、25—30 cm 秸秆高留茬覆盖还田具有较好的保水效应，是试区春小麦栽培较好的秸秆还田方式。

2.1.2 不同生育阶段平均土壤含水量垂直变化 不同秸秆还田方式下春小麦播种、营养生长期、生殖生长期、收获时 0—120 cm 土层土壤含水量在 3 个试验年度差异均显著，且有少耕秸秆还田在各土层保持较高的土壤含水量，提高幅度随土层加深而降低（图 2）。



2014 年，小麦播种期、营养生长期、生殖生长期、收获期对应的日期为 3 月 18 日、4 月 22 日至 6 月 7 日，6 月 19 日至 7 月 14 日、7 月 23 日；2015 年各生育时期对应的日期为 3 月 28 日、4 月 23 日至 6 月 5 日、6 月 21 日至 7 月 15 日、7 月 27 日；2016 年各测定时期对应的日期为 3 月 29 日、4 月 19 日至 6 月 5 日、6 月 26 日至 7 月 12 日、7 月 20 日

The dates were 18 March, 22 April to 7 June, 19 June to 14 July, and 23 July in 2014, 28 March, 23 April to 5 June, 21 June to 15 July, and 27 July in 2015, and 29 March, 19 April to 5 June, 26 June to 12 July, and 20 July in 2016, the corresponding growing periods of wheat were sowing stage, vegetative growth period, reproductive growth stage, harvesting stage, respectively

图 2 不同秸秆还田方式下各测定阶段 0—120 cm 土层土壤含水量的垂直变化

Fig. 2 Vertical changes of soil water content at 0-120 cm soil layer of various determining period under different straw retention approaches

春小麦播种时,耕层 0—30 cm, NTSS、NTS 较 CT 提高土壤含水量分别为 6.5%—9.1%、9.3%—12.9%, NTS 较 TS 提高 5.2%—10.0%。30—90 cm 土层, NTSS、NTS 较 CT 土壤含水量分别提高 4.1%—7.7%、7.2%—9.5%。深层 90—120 cm 土层年际间有差异, 2016 年春小麦播前土壤含水量明显高于 2014 与 2015 年, 弱化了免耕还田的保水效应, 2014 与 2015 年, NTSS、NTS 较 CT 土壤含水量分别提高 4.4%—6.3%、4.0%—6.9%。

春小麦营养生长期, 耕层 0—30 cm, NTSS、NTS 较 CT 提高土壤含水量分别为 3.2%—6.6%、5.9%—9.5%。30—90 cm 土层, NTSS、NTS 较 CT 分别提高 4.0%—6.2%、5.9%—8.8%。深层 90—120 cm 土层年际间有差异, 2014 与 2015 年, NTSS 较 CT 分别提高 5.3%、5.7%, 3 个试验年度, NTS 较 CT 分别提高 5.2%—8.0%。

春小麦生殖生长期, 耕层 0—30 cm, NTSS、NTS 较 CT 提高土壤含水量分别为 4.1%—7.2%、6.4%—8.4%, NTS 较 TS 提高 4.2%—5.2%。30—90 cm 土层, NTS 较 TS、CT 提高土壤含水量分别为 4.1%—5.0%、5.4%—8.6%。深层 90—120 cm, 3 个试验年度, 仅有 NTS 较 CT 分别提高 4.7%、6.2%与 5.8%。

春小麦收获时, 耕层 0—30 cm, NTSS、NTS 较 CT 提高土壤含水量分别为 16.4%—23.4%、24.4%—35.3%, 较 TS 分别提高 6.3%—9.7%、11.7%—20.3%。30—90 cm 土层, NTSS、NTS、TS 较 CT 提高土壤含水量分别为 9.4%—27.4%、13.9%—27.8%、7.2%—11.5%, NTS 较 TS 分别提高 6.3%—14.6%。深层 90—120 cm, 2014 与 2015 年, 与 CT 相比, NTSS 提高土壤含水量分别为 8.7%、19.7%, NTS 分别提高 9.1%、17.1%, TS 分别提高 6.4%、7.2%。

不同秸秆还田处理中, 春小麦播种期、营养生长期、生殖生长期、收获期 0—120 cm 土层土壤水分含量随土层加深其变化减弱, 但各土层均有少耕秸秆覆盖还田保持较高的土壤含水量, 为小麦生长创造适宜的土壤水分环境。春小麦生育期内, 营养生长期与生殖生长期, 补灌弱化了同一秸秆还田方式下不同深度间土壤含水量差异, 且与播种前相比, 各处理各土层土壤含水量明显降低, 尤其是春小麦旺盛生殖生长期降低幅度更大, 以 NTS 处理缩小土壤水分降低比例。

2.2 不同小麦秸秆还田方式对春小麦各生育阶段耗水量、耗水模系数的影响

2016 年, 秸秆还田方式对春小麦全生育期耗水量无显著影响, 而 2014 与 2015 年, NTSS 耗水量较

CT 处理分别降低 3.1%、7.8%, NTS 较 CT 分别降低 4.1%、7.7% (表 2)。

春小麦不同生育阶段耗水量及耗水模系数在 3 个试验年度差异显著。春小麦播种至拔节期耗水量较大, 占总耗水量 22.6%—29.1%, 不同处理年际间有差异, 2014 与 2015 年, NTSS 较 CT 耗水量分别提高 15.1%、5.0%, 耗水模系数分别提高 18.7%、14.0%; 2014 与 2016 年, NTS 较 CT 耗水量分别增大 12.0%、5.6%, 3 个试验年份 NTS 较 CT 耗水模系数分别提高 8.4%—16.8%。随着生育期的推进, 在春小麦拔节至孕穗期, NTSS、NTS 处理耗水量及耗水模系数均小于 CT, 耗水量分别降低 5.6%—13.4%、11.3%—16.7%, 耗水模系数分别减小 3.1%—10.1%、7.5%—13.1%, 以 NTS 降低耗水量及耗水模系数幅度较大, 比 TS 分别低 8.2%—14.2%、5.1%—12.4%。与前一生育阶段相似, 春小麦孕穗至灌浆初期, 3 个试验年度, 少耕秸秆还田均具有降低耗水量及耗水模系数的作用, 以 NTS 降低作用较大。相反, 灌浆期, 春小麦处于旺盛生殖生长期, 耗水量总体增大, 致使灌浆初期至收获期, NTSS、NTS 处理耗水量及耗水模系数均高于 TS 和 CT, NTSS、NTS 较 TS 处理耗水量分别增大 5.9%—11.3%、6.6%—14.8%, 耗水模系数分别提高 7.9%—12.3%、10.3%—16.2%, NTSS、NTS 较 CT 增大耗水量分别为 7.4%—8.3%、5.1%—8.1%, 耗水模系数分别提高 11.7%—16.5%、9.1%—17.1%。

总体来说, 少耕、25—30 cm 秸秆覆盖还田减小了春小麦生育前期 (灌浆期之前) 的耗水, 增大了生育后期 (灌浆期) 的耗水量, 有效协调春小麦前后生育时期耗水互补、竞争关系。

2.3 不同秸秆还田方式下春小麦全生育期棵间蒸发量动态差异

不同秸秆还田方式下春小麦全生育期棵间蒸发量在 3 个试验年度差异不显著, 但均表现为秸秆还田 (NTSS、NTS、TS) 具有抑制春小麦全生育期内土壤蒸发的效应, 较传统无秸秆还田翻耕对照处理 (CT) 相比, 全生育期棵间蒸发量分别降低 9.3%—17.4%、10.8%—23.3%与 4.3%—13.4% (图 3), 3 个秸秆还田处理中, 秸秆覆盖还田配合少耕 (NTS) 降低土壤蒸发效应更好, 比 TS 降低 5.6%—11.4%。

不同秸秆还田方式下春小麦各生育阶段农田棵间蒸发量在 3 个试验年度差异显著, 主要由不同年份不同生育阶段降雨量差异所致。春小麦苗期至拔节期, NTSS、NTS、TS 较 CT 处理土壤蒸发分别降低 9.9%

表 2 不同秸秆还田方式下春小麦各生育阶段的耗水量及耗水模系数

Table 2 Evapotranspiration (ET) and evapotranspiration modulus coefficient (EC) of spring wheat at each of growth period under different straw retention approaches

年份 Year	处理 Treatment	播种—拔节期		拔节—孕穗期		孕穗—灌浆初期		灌浆初期—收获期		全生育期
		Sowing—jointing		Jointing—booting		Booting—early-filling		Early-filling—harvesting		Entire growth period
		ET (mm)	CP (%)	ET (mm)	CP (%)	ET (mm)	CP (%)	ET (mm)	CP (%)	ET (mm)
2014	NTSS	108a	27.5a	88b	22.3b	76d	19.2d	122a	31.0a	393ab
	NTS	105a	27.1a	84b	21.6c	82c	21.0c	118ab	30.4a	389b
	TS	97b	24.5b	98a	24.6a	93b	23.3b	109c	27.6b	397ab
	CT	94b	23.2c	101a	24.8a	99a	24.3a	112bc	27.7b	406a
2015	NTSS	103a	25.8a	94c	23.6bc	87c	21.8b	115a	28.8a	399b
	NTS	100ab	25.2a	93c	23.2c	90c	22.6b	116a	29.0a	399b
	TS	98b	23.4b	103b	24.4ab	111b	26.5a	108b	25.7b	421a
	CT	98b	22.6b	108a	25.1a	119a	27.5a	107b	24.7b	432a
2016	NTSS	113b	27.6bc	95b	23.1a	98b	23.9a	105b	25.5b	411a
	NTS	119a	29.1a	89c	21.7b	90c	21.8b	113a	27.5a	411a
	TS	118ab	28.4ab	97ab	23.3a	103a	24.7a	98c	23.6c	416a
	CT	113b	26.8c	100a	23.8a	102a	24.2a	106b	25.2b	422a

数据后不同字母表示同一年度中所有处理在 0.05 概率水平下差异显著。2014 年，小麦播种期、拔节期、孕穗期、灌浆初期、收获期对应土壤水分测定日期为 3 月 18 日、4 月 22 日、5 月 27 日、6 月 19 日、7 月 23 日；2015 年各测定时期对应日期为 3 月 28 日、4 月 23 日、5 月 30 日、6 月 21 日、7 月 27 日；2016 年对应日期为 3 月 29 日、4 月 19 日、5 月 28 日、6 月 26 日、7 月 20 日。下同
Different letters afterwards indicate significant difference within the same year among the treatments at 0.05 probability level. The measuring dates were 18 March, 22 April, 27 May, 19 June, and 23 July in 2014, 28 March, 23 April, 30 May, 21 June, and 27 July in 2015, and 29 March, 19 April, 28 May, 26 June, and 20 July in 2016. The corresponding growing periods of wheat were sowing, jointing, booting, early-filling, harvesting stage, respectively. The same as below

—36.9%、7.8%—40.5%、5.0%—26.2%，NTSS、NTS 较 TS 分别降低 4.6%—14.5%、4.1%—19.4%（图 3）。相反，春小麦拔节至孕穗期，2015 与 2016 年度，NTSS、NTS 较 CT 土壤蒸发分别提高 8.4%—10.2%、10.1%—10.9%，NTSS、NTS 较 TS 土壤蒸发分别提高 5.8%—6.3%、6.4%—8.0%，2017 年，NTS、TS 较 CT 分别降低 5.9%、4.7%。春小麦生殖生长期（开花期至收获期），均为秸秆还田降低棵间蒸发量，NTSS、NTS、TS 较 CT 土壤蒸发分别降低 18.4%—25.7%、21.4%—34.7%、5.6%—17.1%，秸秆还田处理中，NTSS、NTS 较 TS 降低土壤蒸发分别达到 6.6%—17.5%、12.0%—27.5%。

纵观春小麦全生育期棵间蒸发量动态发现，春小麦开花至成熟期，少耕秸秆还田降低土壤蒸发效应较好，说明少耕秸秆还田对土壤无效蒸发耗水的抑制作用主要体现在开花至成熟期，以 25—30 cm 秸秆高茬覆盖还田结合少耕措施抑制土壤蒸发相对较好。

2.4 不同秸秆还田方式对春小麦全生育期蒸散比（E/ET）的动态影响

不同秸秆还田方式下春小麦全生育期 E/ET 在 3

个试验年度差异不显著，但均表现为少耕秸秆还田降低了春小麦全生育期 E/ET（图 4）。3 个年度，NTSS 与 NTS 较 CT 处理 E/ET 降低分别为 6.4%—15.2%、6.9%—21.3%。

不同秸秆还田方式下春小麦各生育阶段 E/ET 在 3 个试验年度差异显著，均有少耕秸秆还田降低了春小麦各生育阶段 E/ET（图 4）。春小麦播种后至拔节期，3 个试验年份，NTSS、NTS 较 TS 分别降低 6.8%—8.5%、5.3%—16.0%，较 CT 降低 E/ET 分别达到 10.5%—30.7%、5.8%—36.4%。拔节至孕穗期，年际间有差异，2014 年，少耕秸秆还田与传统翻耕无秸秆还田处理 E/ET 差异不显著，TS 较 CT 处理 E/ET 降低 6.9%；2015 与 2016 年度，秸秆还田具有较高 E/ET，NTSS、NTS、TS 较 CT 处理提高 E/ET 分别为 19.4%—35.2%、23.5%—30.6%、6.0%—15.9%，NTSS、NTS 较 TS 分别提高 12.6%—16.6%、12.7%—16.4%。春小麦孕穗至灌浆初期，2014 与 2015 年，NTSS 较 TS、CT 提高 E/ET 分别为 10.0%—14.7%、9.9%—14.7%；相反，2016 年，NTSS、NTS、TS 较 CT 分别降低 E/ET 为 9.9%、15.8%、10.5%，NTS 较 TS 降低 5.9%。春

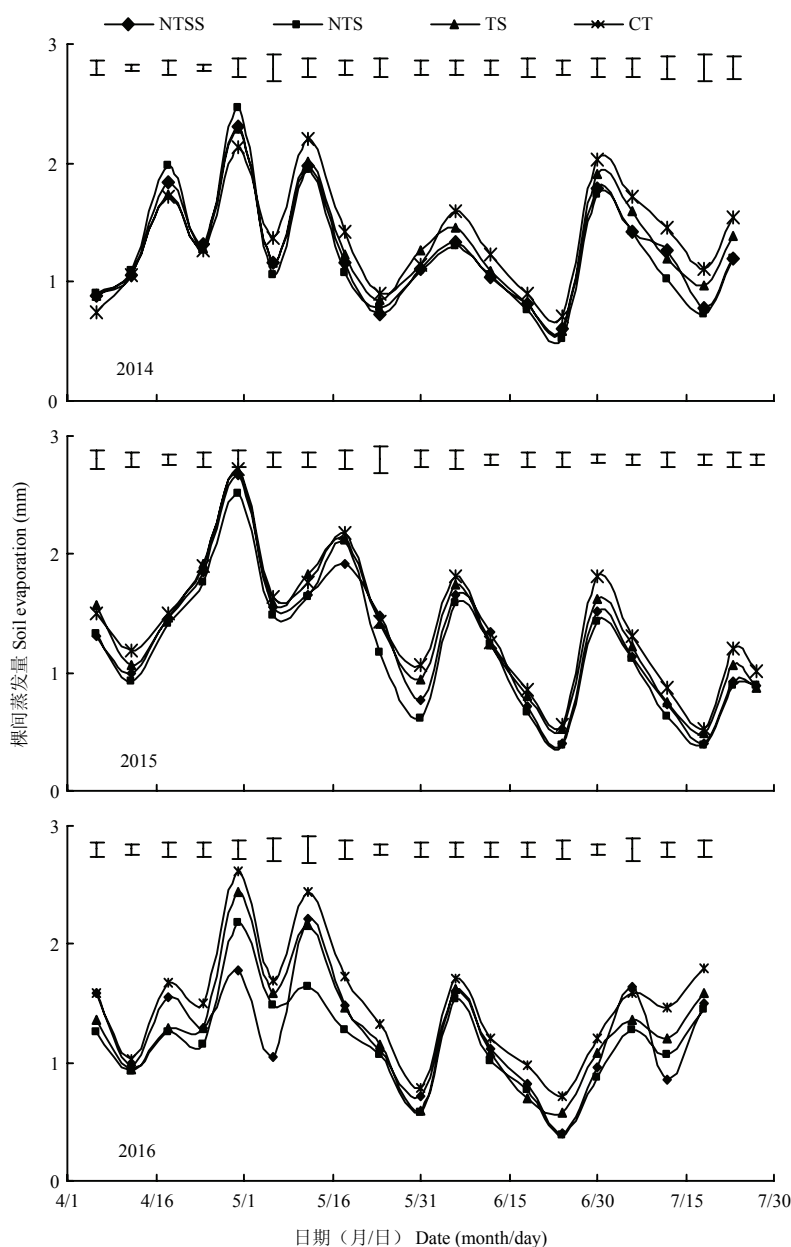


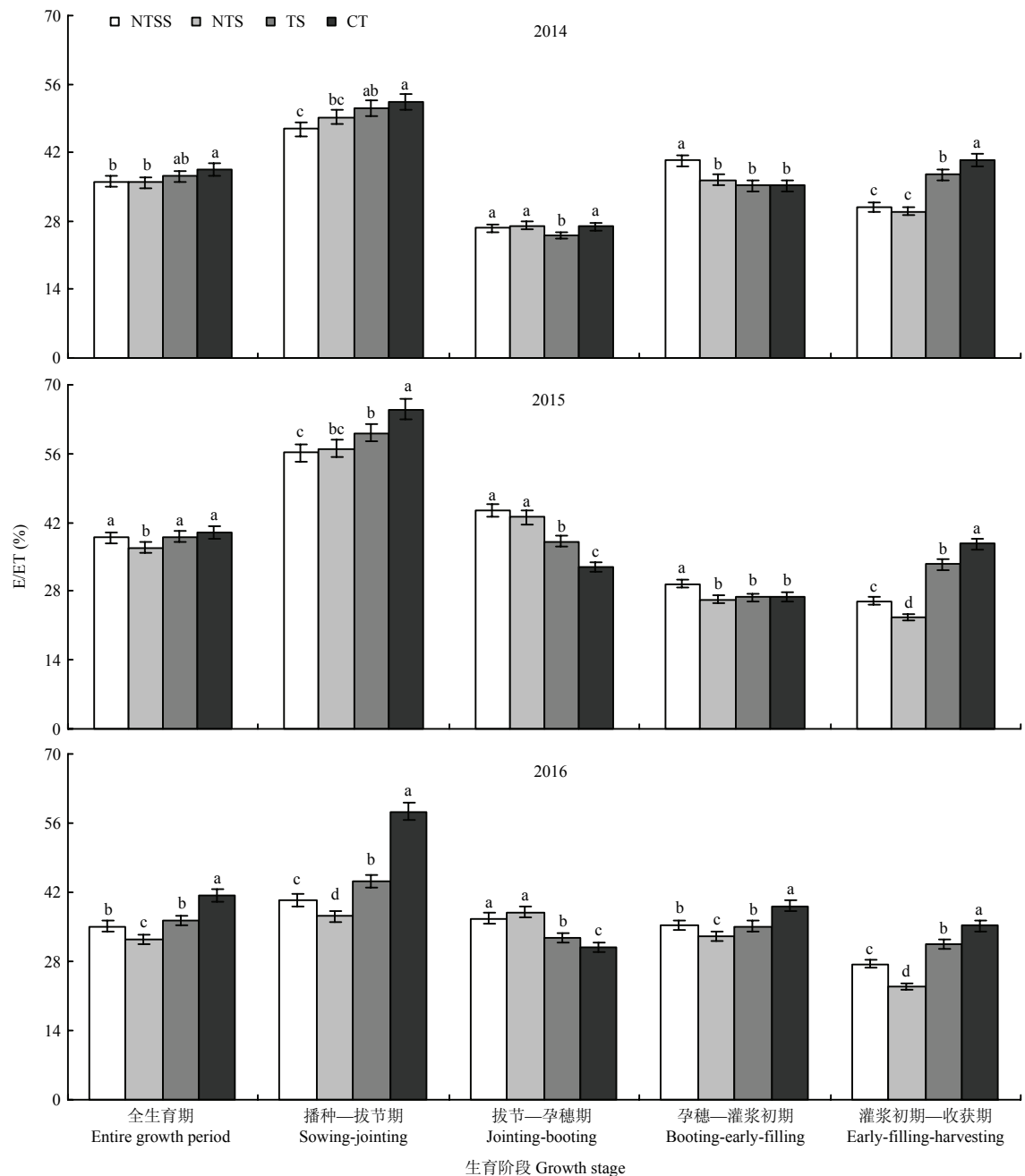
图 3 不同秸秆还田方式下春小麦农田土壤蒸发量动态

Fig. 3 Dynamics of soil evaporation of spring wheat field with different straw retention approaches

小麦灌浆初期至收获期, 秸秆还田因旺盛的生殖生长期, 增大有效耗水而降低 E/ET , NTSS、NTS、TS 较 CT 降低 E/ET 分别为 22.0%—30.8%、25.9%—39.5%、7.5%—11.1%, NTSS、NTS 较 TS 分别降低 12.8%—22.1%、20.0%—32.0%, 与 NTSS 相比, NTS 降低 E/ET 为 12.7%—16.3%。以上结果表明少耕秸秆还田水分高效利用主要是减少了灌浆初期至收获期土壤的无效耗水, 提高了土壤水分利用的有效性, 以少耕 25—30 cm 秸秆高留茬覆盖还田效应突出。

2.5 春小麦产量及水分利用效率对秸秆还田方式的响应

2.5.1 产量表现 3 个试验年度, 不同秸秆还田方式对春小麦籽粒产量具有显著影响, 均表现出秸秆还田具有增产效应 (图 5-A)。与传统低茬收割翻耕 (CT) 相比, 少耕秸秆还田 (NTSS、NTS) 分别增产 16.6%—24.9%、18.6%—27.3%, 翻耕秸秆还田 (TS) 增产 10.2%—18.7%。3 个秸秆还田处理中, 以少耕秸秆还田增产效应明显, NTSS、NTS 较 TS 分别增产 5.2%



图中不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下同
Different letters represent the significant difference between treatments at 0.05 level in the figure. The same as below

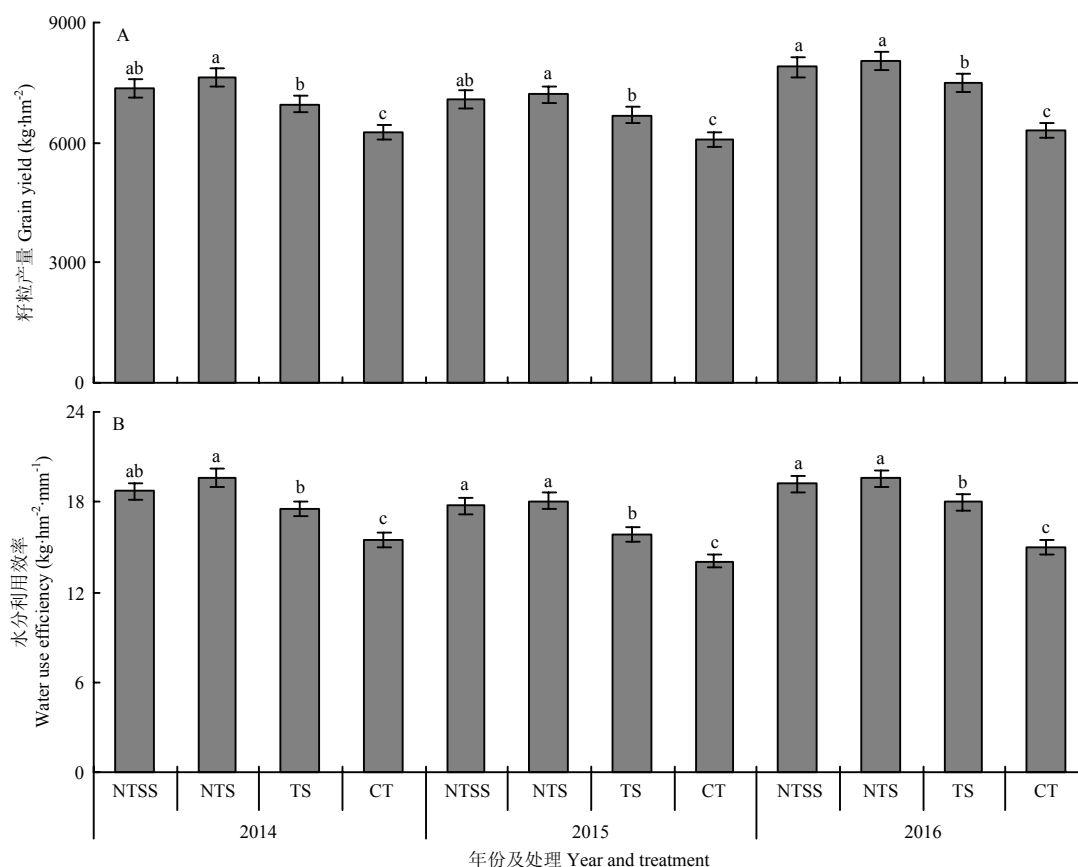
图 4 不同秸秆还田方式下春小麦农田蒸散比 (E/ET) 动态

Fig. 4 Dynamics of evaporation/evapotranspiration (E/ET) of spring wheat field with different straw retention approaches

—5.9%、7.2%—9.5%，以 NTS 籽粒产量最大，达到 7 203—8 035 kg·hm⁻²。由此说明，25—30 cm 秸秆高留茬立茬与覆盖还田结合少耕有利于提高春小麦籽粒产量。

2.5.2 水分利用效率 (WUE) 3 个试验年份，不同

秸秆还田方式下春小麦 WUE 差异显著，秸秆还田较传统低茬收割翻耕具有提高春小麦农田 WUE 的作用，秸秆还田结合少耕进一步增强了提高水分利用效率的优势 (图 5-B)。与 CT 相比，NTSS、NTS、TS 处理提高 WUE 分别为 21.1%—28.3%、26.6%—30.6%、



图中每一试验年份各处理间进行统计分析 The statistical analysis was performed in each treatment in each testing year

图5 春小麦籽粒产量(A)与水分利用效率(B)对不同秸秆还田方式的响应

Fig. 5 Responses of grain yield (A) and water use efficiency (B) for spring wheat to different straw retention approaches

13.1%—20.3%，以 NTSS、NTS 提高春小麦农田 WUE 幅度较大，比 TS 高 6.7%—11.9%、8.6%—13.7%。

3 讨论

3.1 少耕及秸秆还田与耗水特性的关系

近年来，随着水资源的日趋紧缺，干旱环境条件下，农业生产必须以水分的高效利用为重心，而控制土壤蒸发是提高作物水分利用效率的重要途径之一^[14]。秸秆还田作为一项简易节水生产技术广泛地应用于农业生产。采用秸秆覆盖技术可以有效地保持土壤水分，降低无效耗水而提高水分利用的有效性^[15-16]。本研究表明，春小麦不同生育时期，0—120 cm 各土层土壤含水量均有秸秆还田高于传统耕作，而 3 个秸秆还田处理中，少耕秸秆覆盖还田土壤含水量明显高于立茬、翻耕秸秆还田措施，而立茬、翻耕秸秆还田处理土壤含水量在不同生育阶段差异不同，这是因为翻耕还田弱化了秸秆还田保持土壤水分的优势，立茬还田不能在

地表或表土层直接形成秸秆物理隔层，较覆盖还田弱化其保水效应^[7]。春小麦生育期结束时，少耕秸秆覆盖保持较高的土壤水分含量，这可能是由于其土壤界面具有良好的导水蓄水保墒能力^[17]。秸秆覆盖具有降低土壤蒸发及耗水的效应已被研究所证实^[18-19]。本研究中，与传统耕作无秸秆还田处理相比，少耕秸秆覆盖还田显著抑制土壤蒸发，抑制效应主要体现在气温较高的春小麦孕穗至成熟期，主要因为：第一，秸秆覆盖是在土壤表面，减少土壤与大气间水热交换的物理阻隔层，阻碍土壤与大气层间的水分和能量交换，显著降低土壤蒸发^[20]；第二，覆盖还田减少生育前期的土壤水分散失，春小麦生长缓慢，消耗水分与养分较少，随着气温回升，生育前期剩余的土壤水分与养分促使春小麦生长发育旺盛，在孕穗至成熟期保持较大的冠层，遮阴面积大，抑制土壤蒸发相对较好。相对于覆盖秸秆还田，立茬秸秆还田不能在地表或表土层直接形成秸秆物理隔层，对春小麦生育前期土壤温度的降

低作用不及覆盖还田, 生育前期生长较快, 给予生育后期的养分与水分少^[7], 因此立茬秸秆还田生育后期生长弱于秸秆覆盖还田, 冠层相对小, 遮阴面积小, 抑制土壤蒸发效应较弱。同样, 通过分析春小麦播种时、营养生长期、生殖生长期及收获时 0—120 cm 土层土壤含水量发现, 随着土层加深其变化减弱, 但每一土层均有少耕秸秆覆盖还田保持较高的土壤含水量, 为春小麦生长创造适宜的土壤水分环境。

秸秆、地膜覆盖具有降低耗水的效应已被研究证实^[7,15]。本研究中, 少耕秸秆还田对春小麦田耗水量的影响表现出年际间差异, 2014 与 2015 年, 少耕秸秆还田的耗水量均低于传统耕作; 2016 年, 秸秆还田与传统耕作处理春小麦农田耗水量无显著差异, 这是因为此年春小麦播种时的土壤储水量明显高于 2014 与 2015 年, 弱化了少耕秸秆还田的保水及有效利用土壤水分的效应。另一方面, 秸秆还田也可因为其调控土壤水热特性而优化作物生长发育动态, 特别是少耕秸秆覆盖还田作物生长前期的低温效应与较好抑制土壤蒸发的效应, 更多水分用于热量适宜的生育后期^[7], 即降低了春小麦营养生长期的无效蒸发耗水, 增强了其生殖生长期的有效耗水。因此, 少耕秸秆覆盖还田通过减小春小麦生育前期(灌浆期之前)的耗水, 增大了生育后期(灌浆初期至成熟期)的耗水量, 有效协调春小麦前后生育时期需水矛盾。降低土壤无效蒸发耗水占总耗水模系数(E/ET)是提高水分有效利用的主要途径之一^[21]。本研究中少耕秸秆还田降低了春小麦全生育期 E/ET , 且降低作用主要体现在春小麦旺盛生长的灌浆初期至收获期, 以少耕秸秆覆盖还田降低作用较大, 这是因为该措施此生育阶段春小麦旺盛生长期较高的蒸腾耗水与较小的蒸发耗水所致。因此, 少耕秸秆覆盖还田措施可优化干旱灌区春小麦农田的耗水特性, 在农田作物耗水与调控领域值得进一步试验探讨。

3.2 少耕及秸秆还田对作物产量的影响

耕作及覆盖措施是调控作物群体生长发育的重要因素, 通过优化耕作方式及覆盖措施, 调控作物生长发育动态, 改善作物对资源利用的竞争与互补关系, 有效提高作物产量^[5]。秸秆还田结合少免耕因较好的保水效应及改善土壤理化性质被广泛应用于干旱雨养农业区作物生产, 在干旱绿洲灌区秸秆还田技术尚未成熟, 有待进一步研发适宜于干旱灌区秸秆还田技术。大量研究证实, 长期单一免耕因根冠早衰而具有减产效应^[10-11]。秸秆还田较传统耕作具有较高的增产潜

力, 其增产机理在于秸秆还田降低土壤容重, 提高土壤速效养分含量促进作物对养分的吸收和利用, 为高产奠定了物质基础^[22-23]。有研究表明, 可通过优化耕作及覆盖措施促进作物各器官光合同化物向籽粒的运转而增产^[24]。本研究秸秆立茬与覆盖还田结合少耕的具有显著增产优势, 其原因在于, 第一, 少耕结合秸秆覆盖还田为作物生长创造良好的耕层土壤结构^[12-13]; 第二, 少耕秸秆覆盖还田延缓春小麦生育前期地上部生长发育, 造成较小的光合源, 对水分养分等资源消耗较少, 同时抑制土壤蒸发而提高土壤蓄水纳墒能力, 为作物生育后期(旺盛生长期)遗留更多的土壤水分和养分^[25], 满足作物适宜环境下生育后期旺盛生长的资源需求, 延缓地上部的衰老, 改善功能叶片的光合特性, 促使籽粒灌浆而实现高产^[25]; 第三, 秸秆覆盖还田配合少耕技术利于光合产物向籽粒的转移, 较高的分蘖数及分蘖成穗率与较多的穗粒数^[26]。因此, 在干旱绿洲灌区集成应用基于保护性耕作理论的少耕秸秆覆盖还田技术是可行的, 值得大面积推广应用。

3.3 作物水分利用效率对少耕秸秆还田的响应

提高产量、降低耗水是提高农田水分利用效率的两个主要途径。优化耕作及秸秆还田方式通过降低农田土壤水分无效蒸发, 提高作物有效蒸腾耗水而提高农田水分利用效率^[27-28]。已有研究表明, 在作物生育期内, 降水较多的丰水年份, 秸秆覆盖还田结合免耕通过降低农田总耗水量而提高水分利用效率, 在降水相对较少的贫水年份, 免耕秸秆覆盖还田主要因提高作物产量而提高水分利用效率^[5]。当然, 免耕秸秆覆盖还田也可通过提高土壤水分入渗率及贮水量^[17]、有效降低作物生育前期无效蒸发水分, 增加生育后期作物的有效蒸腾, 使无效耗水转化为有效耗水、提高作物产量与水分利用效率^[5]。本研究得出相似结果, 与传统无秸秆还田翻耕处理相比, 秸秆还田提高了水分利用效率, 以少耕秸秆覆盖还田提高幅度相对较大, 主要是因为少耕秸秆覆盖还田降低了春小麦全生育期棵间蒸发量, 减小了总耗水量而提高了籽粒产量, 特别是在春小麦旺盛生长的灌浆初期至收获期, 降低土壤蒸发而提高有效蒸腾耗水作用最显著, 为春小麦籽粒灌浆提供充足的水分需求, 而增强籽粒灌浆, 提高籽粒产量, 进而增大水分利用效率。因此, 在资源性缺水的干旱内陆灌区, 在春小麦生产中集成免耕秸秆还田技术有望缓解作物需水与供水矛盾, 为试区作物高效生产提供理论与实践依据。

4 结论

与传统低茬收割翻耕处理(CT)相比,少耕秸秆还田处理(NTSS、NTS)可提高春小麦全生育期内土壤含水量,降低耗水量,通过减少生育前期(灌浆期之前)耗水,增大生育后期(灌浆初期至成熟期)耗水量,有效协调春小麦前后生育时期需水矛盾,以少耕秸秆覆盖还田(NTS)调控效应更为突出。少耕秸秆还田降低了春小麦全生育期棵间蒸发量,降低了蒸散比(E/ET),主要体现在春小麦灌浆初期至收获期。与CT相比,NTSS、NTS具有明显的增产及提高水分利用效率的作用。因此,在水资源短缺的干旱内陆绿洲灌区,集成应用少耕25—30 cm秸秆立茬与覆盖还田技术是实现春小麦高产、稳产、水分高效利用的理想耕作措施。

References

- [1] 张建军, 樊廷录, 党翼, 赵刚, 王磊, 李尚中, 王淑英, 王勇. 黄土旱塬耕作方式和施肥对冬小麦产量和水分利用特性的影响. 中国农业科学, 2017, 50(6): 1016-1030.
ZHANG J J, FAN T L, DANG Y, ZHAO G, WANG L, LI S Z, WANG S Y, WANG Y. Effects of long-term tillage and fertilization on yield and water use efficiency of winter wheat in loess dry land plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 1016-1030. (in Chinese)
- [2] DONG Q, YANG Y, YU K, FENG H. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 133-143.
- [3] 李玉玲, 张鹏, 张艳, 贾倩民, 刘东华, 董昭芸, 贾志宽, 韩清芳, 任小龙. 旱区集雨种植方式对土壤水分、温度的时空变化及春玉米产量的影响. 中国农业科学, 2016, 49(6): 1084-1096.
LI Y L, ZHANG P, ZHANG Y, JIA Q M, LIU D H, DONG Z Y, JIA Z K, HAN Q F, REN X L. Effects of rainfall harvesting planting on temporal and spatial changing of soil water and temperature, and yield of spring maize (*Zea mays* L.) in semi-arid areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1084-1096. (in Chinese)
- [4] 骆兰平, 于振文, 王东, 张永丽, 石玉. 土壤水分和种植密度对小麦旗叶光合性能和干物质积累与分配的影响. 作物学报, 2011, 37(6): 1049-1059.
LUO L P, YU Z W, WANG D, ZHANG Y L, SHI Y. Effects of planting density and soil moisture on flag leaf photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and distribution in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(6): 1049-1059. (in Chinese)
- [5] WANG X B, CAI D X, HOOOGMOED W B, OENEMA O, PERDOK U D. Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(2): 239-250.
- [6] VITA P D, PAOLO E D, FECONDO G, FONZO N D, PISANTE M. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1): 69-78.
- [7] 殷文, 陈桂平, 柴强, 赵财, 冯福学, 于爱忠, 胡发龙, 郭瑶. 前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响. 中国农业科学, 2016, 49(15): 2898-2908.
YIN W, CHEN G P, CHAI Q, ZHAO C, FENG F X, YU A Z, HU F L, GUO Y. Responses of soil water and temperature to previous wheat straw treatments in plastic film mulching maize field at Hexi corridor. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(15): 2898-2908. (in Chinese)
- [8] CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, SUN H Y, CHEN S L. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: Field experiments on the North China Plain. *Annals of Applied Biology*, 2007, 150(3): 261-268.
- [9] 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. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19.
GAO Y J, LI S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dry land. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 15-19. (in Chinese)
- [10] LAMPURLANES J, ANGAS P, CANTEROMARTINEZ C. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Research*, 2001, 69(1): 27-40.
- [11] AON M A, SARENA D E, BURGOS J L, CORTASSA S. (Micro)biological, chemical and physical properties of soils subjected to conventional or no-till management: An assessment of their quality status. *Soil and Tillage Research*, 2001, 60(3/4): 173-186.
- [12] FENG F X, HUANG G B, CHAI Q, YU A Z. Tillage and straw management impacts on soil properties, root growth, and grain yield of winter wheat in Northwestern China. *Crop Science*, 2010, 50(4): 1465-1473.
- [13] SPEDDING T A, HAMEL C, MEHUYS G R, MADRAMOOTOO C A. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 499-512.
- [14] CHAI Q, GAN Y T, TURNER N C, ZHANG R Z, YANG C, SIDDIQUE K H M. Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Advances in Agronomy*, 2014, 126: 149-202.
- [15] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田

- 对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2014, 47(17): 3359-3371.
- ZHAO Y L, XUE Z W, GUO H B, MU X Y, LI C H. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3359-3371. (in Chinese)
- [16] SEKAHO N, HIRA G, SISHU A, THIDN S. Response of soyabean (*Glycine max* Mer.) to wheat straw mulching in different cropping seasons. *Soil and Use Management*, 2005, 21(4): 422-426.
- [17] 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 黄高宝, 李玲玲, 谢军红. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1362-1368.
- CAI L Q, LUO Z Z, ZHANG R Z, HUANG G B, LI L L, XIE J H. Effect of different tillage methods on soil water retention and infiltration capability of rainfed field. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5): 1362-1368. (in Chinese)
- [18] 柏会子, 王洋, 石海, 陈笑莹. 秸秆不同还田方式对土壤蒸发特性影响. 土壤与作物, 2012, 1(4): 241-247.
- BAI H Z, WANG Y, SHI H, CHEN X Y. Influence of different straw-returning approaches on soil evaporation characteristics. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 241-247. (in Chinese)
- [19] BALWINDER S, EBERBACH P L, HUMPHREYS E, KUKAL S S. The effect of rice straw mulch on evapotranspiration, transpiration and soil evaporation of irrigated wheat in Punjab, India. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(12): 1847-1855.
- [20] 员学锋, 吴普特, 汪有科, 徐福利. 免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究. 农业工程学报, 2006, 22(7): 22-26.
- YUAN X F, WU P T, WANG Y K, XU F L. Soil moisture conserving irrigation under straw mulch with no-tillage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 22-26. (in Chinese)
- [21] 柴强, 于爱忠, 陈桂平, 黄鹏. 单作与间作的棵间蒸发量差异及其主要影响因子. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1307-1312.
- CHAI Q, YU A Z, CHEN G P, HUANG P. Soil evaporation under sole cropping and intercropping systems and the main driving factors. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2011, 19: 1307-1312. (in Chinese)
- [22] ZHANG B, PANG C Q, QIN J T, LIU K L, XU H, LI H X. Rice straw incorporation in winter with fertilizer-N application improves soil fertility and reduces global warming potential from a double rice paddy field. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(8): 1039-1052.
- [23] 王幸, 邢兴华, 徐泽俊, 齐玉军, 季春梅, 吴存祥. 耕作方式和秸秆还田对黄淮海夏大豆产量和土壤理化性状的影响. 中国油料作物学报, 2017, 39(6): 834-841.
- WANG X, XING X H, XU Z J, QIN Y J, JI C M, WU C X. Effects of tillage and straw returning on soybean yield and soil physicochemical properties in Yellow-Huai-Hai Rivers Valley. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(6): 834-841. (in Chinese)
- [24] 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 柴强, 胡发龙, 郭瑶. 小麦秸秆还田方式对轮作玉米干物质累积分配及产量的影响. 作物学报, 2016, 42(5): 751-757.
- YIN W, FENG F X, ZHAO C, YU A Z, CHAI Q, HU F L, GUO Y. Effects of wheat straw returning patterns on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of rotation maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 751-757. (in Chinese)
- [25] 郭瑶, 柴强, 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠. 绿洲灌区小麦免耕秸秆还田对后作玉米产量性能指标的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 69-77.
- GUO Y, CHAI Q, YIN W, FENG F X, ZHAO C, YU A Z. Effect of wheat straw return to soil with zero-tillage on maize yield in irrigated oases. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2017, 25(1): 69-77. (in Chinese)
- [26] 殷文, 陈桂平, 柴强, 郭瑶, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 刘畅. 河西灌区不同耕作与秸秆还田方式对春小麦出苗及产量的影响. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 180-187.
- YIN W, CHEN G P, CHAI Q, GUO Y, FENG F X, ZHAO C, YU A Z, LIU C. Effect of tillage and straw retention mode on seedling emergence and yield of spring wheat in the Hexi Irrigation Area. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2017, 25(2): 180-187. (in Chinese)
- [27] 秦舒浩, 黄高宝. 不同耕作措施下绿洲灌区冬小麦蒸发蒸腾特性及产量效应. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 611-614.
- QIN S H, HUANG G B. Characteristics of winter wheat evapotranspiration and yield performance under different tillage practices in oasis-irrigated farmland. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2008, 16(3): 611-614. (in Chinese)
- [28] YIN W, YU A Z, CHAI Q, HU F L, FENG F X, GAN Y T. Wheat and maize relay-planting with straw covering increases water use efficiency up to 46%. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2): 815-825.

(责任编辑 李云霞)