

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.01432

土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响

郑成岩 崔世明 王东 于振文* 张永丽 石玉

山东农业大学农学院 / 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 山东泰安 271018

摘 要: 2007—2010 小麦生长季, 以高产小麦品种济麦 22 为材料, 利用测墒补灌技术确定灌水量, 研究高产条件下条旋耕、深松+条旋耕、旋耕、深松+旋耕和翻耕 5 种耕作方式对小麦的耗水特性、干物质积累与分配、籽粒产量及水分利用效率的影响。结果表明, 深松+条旋耕和深松+旋耕的农田耗水量和 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量高于条旋耕和旋耕处理, 深松+条旋耕的小麦株间蒸发量低于深松+旋耕和翻耕处理。深松+条旋耕和深松+旋耕成熟期的干物质积累总量、籽粒的干物质分配量及分配比例和开花后干物质同化量对籽粒的贡献率均高于翻耕处理, 翻耕高于旋耕和条旋耕处理, 条旋耕最低。深松+条旋耕 3 个生长季均获得高的籽粒产量, 分别为 9 409.01 kg hm⁻²、9 613.86 kg hm⁻² 和 9 698.42 kg hm⁻², 与深松+旋耕处理无显著差异, 翻耕处理次之, 条旋耕和旋耕低于上述处理, 条旋耕最低。深松+条旋耕处理的水分利用效率在 2007—2008 生长季与深松+旋耕处理无显著差异; 在 2008—2010 生长季最高, 分别为 21.39 kg hm⁻² mm⁻¹ 和 22.09 kg hm⁻² mm⁻¹, 深松+旋耕处理次之, 旋耕和条旋耕低于翻耕处理。在本试验条件下, 深松+条旋耕是兼顾高产节水的最佳耕作方式。

关键词: 小麦; 耕作方式; 干物质积累与分配; 籽粒产量; 水分利用效率

Effects of Soil Tillage Practice on Dry Matter Production and Water Use Efficiency in Wheat

ZHENG Cheng-Yan, CUI Shi-Ming, WANG Dong, YU Zhen-Wen*, ZHANG Yong-Li, and SHI Yu

College of Agronomy, Shandong Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Cultivation, Ministry of Agriculture, Tai'an 271018, China

Abstract: Simultaneous increase of grain yield and water use efficiency is an ideal aim and a hot focus in crop production and research, especially in Yellow-Huaihe-Haihe Rivers Plain of China where wheat (*Triticum aestivum*) production is frequently threatened by drought stress. The objective of this study was to disclose the effects of tillage practice on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in wheat plant under high-yielding and flexible irrigation conditions. In a continuous experiment across three growing seasons from 2007 to 2010, we planted wheat cultivar Jimai 22 with five tillage treatments including strip rotary tillage (SR), strip rotary tillage after subsoiling (SRS), rotary tillage (R), rotary tillage after subsoiling (RS), and plowing tillage (P). All tillage treatments were irrigated at sowing, jointing, and anthesis stages to a designed soil water content based on testing soil moisture before watering. The total water consumption amount was higher in SRS and RS treatments than in SR and R treatments. Comparing with other treatments, SRS treatment increased the soil water consumption amount in 0–200 cm soil layers, but decreased the soil evaporation. SRS and RS treatments gained the highest amount of dry matter accumulation, the grain dry matter partitioning at maturity, and contribution of dry matter assimilation amount after anthesis to grain, followed by P treatment, and R and SR treatments showed the lowest levels in the above parameters, particularly SR treatment. SRS treatments had the highest grain yield of 9 409.01, 9 613.86, and 9 698.42 kg ha⁻¹ in 2007–2010 growing seasons respectively, with no significant difference from RS treatment. P and R treatments ranked the second and third places. Grain yield in SR treatment was the lowest among treatments. In the 2008–2009 and 2009–2010 growing seasons, the water use efficiencies of SRS treatment were the highest among treatments, which were 21.39 kg ha⁻¹ mm⁻¹ and 22.09 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectively. RS

本研究由国家自然科学基金项目(30871478)和农业部现代小麦产业技术体系项目(nycytx-03)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 于振文, E-mail: yuzw@sdau.edu.cn, Tel: 0538-8241484

第一作者联系方式: E-mail: qdjmczy@163.com

Received(收稿日期): 2010-11-29; Accepted(接受日期): 2011-04-27; Published online(网络出版日期): 2011-06-13.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20110613.1456.019.html>

treatment also had higher water use efficiency than SR, R, and P treatments. Therefore, we recommend that SRS is the most appropriate tillage practice in high-yielding and water-saving production of wheat in the Yellow-Huaihe-Haihe Rivers Plain.

Keywords: Wheat; Tillage practice; Dry matter accumulation and distribution; Grain yield; Water use efficiency

黄淮海地区是我国冬小麦主产区, 水资源短缺且分配不均是制约该地区小麦生产的主要因子。传统农业的连年翻耕加剧了水土流失, 耗能过多, 效益降低^[1]。具有节水抗旱作用的保护性耕作是一种以秸秆覆盖处理和免耕播种技术为核心的新型耕作方法, 能保持水土、增加土壤水分、改善土壤质量和提高作物产量, 有利于农业生产的可持续性发展^[2-4]。小麦开花至成熟期是籽粒产量形成的关键时期, 此期功能叶片的光合产物对籽粒的贡献达 80% 左右^[5]。有研究表明, 深松覆盖的处理可以改善旗叶光合特性^[6], 提高小麦干物质生产量和花后干物质向籽粒的转运^[7]。免耕和秸秆覆盖具有良好的保墒作用, 能有效提高土壤贮水量和水分利用效率^[2], 亦有研究表明, 旋耕的土壤贮水量、籽粒产量和水分利用效率均高于常规翻耕和免耕处理^[8]。有研究指出, 在旱作条件下, 少免耕有利于提高小麦的籽粒产量^[9]。但多年少免耕导致土壤坚实, 土壤容重增大, 影响作物根系对土壤养分和水分的吸收^[10-11]。深松耕作通过深松铲疏松土壤, 加深耕层而不翻转土壤, 可降低土壤容重, 增加土壤的通透性, 有利于作物生长发育, 提高作物产量^[12-13]。前人研究多集中于旱地条件下保护性耕作对土壤水分、养分及作物产量的影响, 而在黄淮冬麦区水浇地条件下不同耕作方式对小麦开花后干物质积累和分配及籽粒产量影响的报道较少。本文利用测墒补灌技术确定灌水量, 在高产条件下设置 5 种耕作方式, 研究小麦耗水特性和干物质积累与分配的变化规律, 分析不同耕作方式对小麦籽粒产量和水分利用效率的影响, 以期确定为确定高产节水耕作技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2007—2010 小麦生长季在山东省兖州市小孟镇史王村同一地块进行 3 年度定位试验, 供试品种为高产小麦济麦 22。2007—2008 生长季试验设置 5 种耕作方式, 分别为条旋耕(SR, strip rotary tillage)、深松+条旋耕(SRS, strip rotary tillage after subsoiling)、旋耕(R, rotary tillage)、深松+旋耕(RS, rotary tillage after subsoiling)、翻耕(P, plowing tillage)。2008—2009 和 2009—2010 生长季试验在 2007—2008 生长

季的试验区内设置同一处理, “深松+条旋耕”和“深松+旋耕”处理不再深松。分析 3 个生长季的试验结果, 以研究土壤经一次深松耕作后对小麦籽粒产量和水分利用效率影响的后效, 降低机械作业成本。3 个生长季试验设置相同灌水处理为底墒水+拔节水+开花水, 设置灌水后 0~140 cm 土层土壤相对含水量在播种期、拔节期和开花期分别达到 85%、75%和 75%。

2007—2008 生长季, 播种前试验田 0~20 cm 土层含有机质 1.41%、全氮 1.00%、碱解氮 103.13 mg kg⁻¹、速效磷 23.30 mg kg⁻¹和速效钾 121.58 mg kg⁻¹。小麦生育期间降水量, 播种至拔节期 51.4 mm, 拔节至开花期 88.4 mm, 开花至成熟期 88.2 mm。播前底肥为每公顷施纯氮 123 kg、P₂O₅ 172.5 kg 和 K₂O 135 kg, 拔节期每公顷开沟追施 150 kg 纯氮。2007 年 10 月 8 日播种, 2008 年 6 月 7 日收获。

2008—2009 生长季, 播种前试验田 0~20 cm 土层含有机质 1.45%、全氮 1.03%、碱解氮 106.81 mg kg⁻¹、速效磷 35.18 mg kg⁻¹和速效钾 116.90 mg kg⁻¹。小麦生育期间降水量为: 播种至拔节期 60.7 mm、拔节至开花期 53.6 mm、开花至成熟期 26.3 mm。小区面积为 4 m×4 m=16 m², 播前底肥为每公顷施纯氮 105 kg, P₂O₅ 150 kg, K₂O 150 kg, 拔节期每公顷开沟追施 135 kg 纯氮。2008 年 10 月 8 日播种, 2009 年 6 月 10 日收获。

2009—2010 生长季, 播种前试验田 0~20 cm 土层含有机质 1.48%、全氮 1.06%、碱解氮 104.30 mg kg⁻¹、速效磷 34.55 mg kg⁻¹和速效钾 124.92 mg kg⁻¹。小麦生育期间降水量为: 播种至拔节期 94.2 mm、拔节至开花期 27.0 mm、开花至成熟期 42.0 mm。化肥施用量与 2008—2009 生长季相同。2009 年 10 月 9 日播种, 2010 年 6 月 17 日收获。

各年度小区面积均为 4 m×4 m=16 m², 小区之间设置 2 m 宽保护行, 随机区组设计, 3 次重复。均在小麦四叶期定苗, 留苗密度 180 株 m⁻², 按当地高产田进行生长期田间管理。

1.2 土壤耕作程序

1.2.1 条旋耕 前茬玉米秸秆全部粉碎还田→2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机一次性完成播种行旋耕(深度 15 cm)、施底肥、播种、起畦作业。

2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机, 设置行距为 18 cm+32 cm, 只在播种开沟器前安装旋耕刀, 仅对播种行 18 cm 宽的秸秆和根茬进行旋耕粉碎, 播种行之间 32 cm 的土壤保持免耕不动, 旋耕面积为总面积的 36%, 称为条旋耕。

1.2.2 深松+条旋耕 前茬玉米秸秆全部粉碎还田→ZS-180 型振动深松机深松 1 遍(深度 38 cm)→2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机一次性完成播种行条旋耕、施底肥、播种、起畦作业。

1.2.3 旋耕 前茬玉米秸秆全部粉碎还田→撒施底肥→旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm)→耙地 2 遍→筑埂打畦→机播下种。

1.2.4 深松+旋耕 前茬玉米秸秆全部粉碎还田→撒施底肥→ZS-180 型振动深松机深松 1 遍(深度 38 cm)→旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm)→耙地 2 遍→筑埂打畦→机播下种。

1.2.5 翻耕 前茬玉米秸秆全部粉碎还田→撒施底肥→铧式犁耕翻(深度 25 cm)→旋耕机对全部土地面积旋耕 2 遍(深度 15 cm)→耙地 2 遍→筑埂打畦→机播下种。

1.3 土壤含水量测定及灌水量计算

用土钻取 0~200 cm 土层的土, 每 20 cm 为一层, 将样品立即装入铝盒, 110℃烘干至恒重, 计算土壤含水量。

设计小麦播种期、拔节期和开花期 0~140 cm 的土壤平均相对含水量为目标含水量, 在各生育时期首先测定土壤相对含水量, 然后依据计算达到目标含水量需补充的灌水量进行灌溉, 即测墒补灌。灌水量(mm)由 $m=10\rho b \cdot H(\beta_i-\beta_j)$ 计算得出^[14]。式中, H 为该时段土壤计划湿润层的深度(cm), ρb 为计划湿润层内土壤容重(g cm^{-3}), β_i 为设计含水量(田间持水量乘以设计相对含水量), β_j 为自然含水量(占干土重的百分数), 即灌溉前土壤含水量。用水表计量灌水量。

1.4 农田耗水量及水分利用效率和灌溉效益计算

采用测定土壤含水量计算耗水量的方法^[15], $ET_{1-2}=10\sum\gamma_i H_i(\theta_{i1}-\theta_{i2})+M+P_0+K$, ($i=1, 2, \dots, n$)。式中, ET_{1-2} 为阶段耗水量; i 为土层编号; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤干容重; H_i 为第 i 层土壤厚度; θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末的含水量, 以占干土重的百分数计; M 为时段内的灌水量; P_0 为有效降水量; K 为时段内的地下水补给量。当地下水埋深大于 2.5 m 时, K 值可以不计; 本试验的地下水埋深

在 5 m 以下, 因此无地下水补给。

水分利用效率、灌溉效益的计算公式分别为 $WUE=Y/ET_a$ ^[16-17] 和 $IB=\Delta Y/I$ ^[18]。式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), Y 为籽粒产量(kg hm^{-2}), ET_a 为小麦生育期间实际耗水量(mm), 即各阶段耗水量之和; IB 为灌溉效益($\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$), ΔY 为灌溉后增加的产量(kg hm^{-2}), I 为实际灌水量(mm)。

1.5 株间蒸发量测定方法

采用自制的小型蒸发器测定冬小麦株间蒸发量^[19], 将其置冬小麦行间, 分别在苗期、越冬期、拔节期、开花期和灌浆期连续 7 d 对蒸发量进行测定。该蒸发器用 PVC 管做成, 内径为 7.5 cm, 壁厚 5 mm。每次取土时, 将其垂直压入土壤内, 然后用自封袋封底, 每天 17:00 用精度为 0.001 g 的电子天平称量后立即放回行间, 2 d 内质量的差值为其蒸发量。为保证操作时不破坏附近土体结构, 用内径为 10 cm 的 PVC 管做成外套, 固定于土壤中, 使其表面与附近土壤持平。蒸发器中原状土每 2~3 d 更换一次, 降雨或灌溉后立即更换原状土体。

1.6 干物质测定和计产

于越冬、返青、拔节、开花和成熟期进行群体动态调查和取样, 其中前 3 个生育期留取整株样品, 开花和成熟期分为籽粒、叶片、茎秆+叶鞘和颖壳+穗轴 4 部分。样品于烘干箱 80℃烘至恒重, 称干重。小麦收获后晒干称重计产, 籽粒含水量为 12.5%, 计算公式^[20]如下:

营养器官开花前贮藏同化物运转量 = 开花期干重-成熟期干重

营养器官开花前贮藏同化物运转率(%) = (开花期干重-成熟期干重)/开花期干重×100

开花后同化物输入籽粒量 = 成熟期籽粒干重-营养器官开花前贮藏物质运转量

对籽粒产量的贡献率(%) = 开花前营养器官贮藏物质运转量/成熟期籽粒干重×100

1.7 数据处理与分析方法

用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据计算和作图, 用 DPS7.05 统计分析软件进行数据差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对小麦 0~200 cm 各土层土壤贮水消耗量的影响

2008—2009 生长季, 深松+条旋耕 40~200 cm

各土层的土壤贮水消耗量高于条旋耕处理; 深松+旋耕 40~160 cm 各土层的土壤贮水消耗量高于旋耕处理, 表明土壤深松后小麦对土壤贮水的消耗量增加。深松+条旋耕 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量为 225.60 mm 与深松+旋耕处理的 219.32 mm 无显著差异, 均显著高于翻耕处理(203.71 mm), 在 40~160 cm 各土层的土壤贮水消耗量均高于翻耕处理, 在 0~40 cm 和 160~200 cm 各土层的土壤贮水消耗量与翻耕处理无显著差异。旋耕在 40~120 cm 各土层的

土壤贮水消耗量均低于翻耕处理, 这是旋耕 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量低于翻耕处理的原因之一。条旋耕处理 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量最低, 为 180.22 mm, 其 120~200 cm 各土层的土壤贮水消耗量显著低于其他处理, 表明条旋耕有利于保持较高的土壤贮水量。小麦对土壤贮水尤其是深层土壤水分的利用少(图 1)。2009—2010 生长季, 各处理 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量的变化规律与 2008—2009 生长季趋势一致。

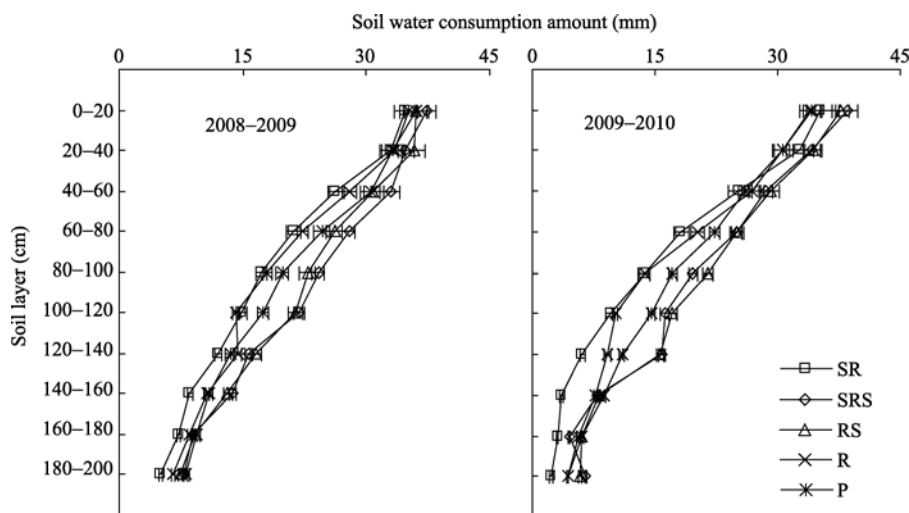


图 1 耕作方式对不同土层土壤贮水消耗量的影响

Fig. 1 Effects of different tillage practices on soil water consumption amount in various soil layers

SR: 条旋耕; SRS: 深松+条旋耕; RS: 深松+旋耕; R: 旋耕; P: 翻耕。

SR: strip rotary tillage; SRS: strip rotary tillage after subsoiling; RS: rotary tillage after subsoiling; R: rotary tillage; P: plowing tillage.

2.2 耕作方式对小麦株间蒸发的影响

小麦的株间蒸发量在苗期和越冬期均为深松+旋耕、翻耕、旋耕>深松+条旋耕、条旋耕(图 2); 在

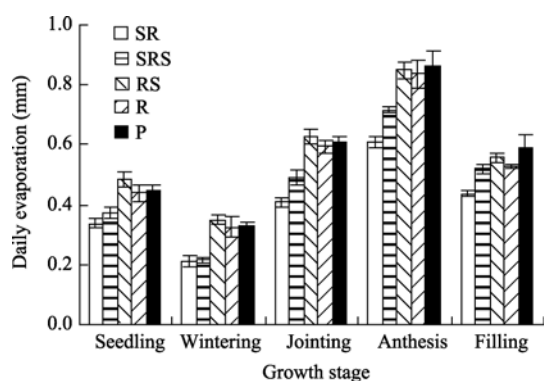


图 2 耕作方式对小麦株间蒸发的影响(2008—2009)

Fig. 2 Effect of different soil tillage practices on evaporation in field (2008—2009)

SR: 条旋耕; SRS: 深松+条旋耕; RS: 深松+旋耕; R: 旋耕; P: 翻耕。

SR: strip rotary tillage; SRS: strip rotary tillage after subsoiling; RS: rotary tillage after subsoiling; R: rotary tillage; P: plowing tillage.

拔节期和开花期均为深松+旋耕、翻耕、旋耕>深松+条旋耕>条旋耕; 在灌浆期为翻耕、深松+旋耕>旋耕、深松+条旋耕>条旋耕。深松+条旋耕处理各生育时期的株间蒸发量比深松+旋耕和翻耕处理分别低 29.5%、61.8%、27.7%、18.6%、7.0%和 20.8%、52.6%、24.5%、20.7%、13.8%, 表明深松+条旋耕有利于降低土壤水分向大气中的耗散。

2.3 耕作方式对小麦干物质积累与分配的影响

2.3.1 不同生育时期干物质积累量 两生长季小麦在返青期的干物质积累量为深松+旋耕、翻耕、旋耕>深松+条旋耕、条旋耕; 拔节期为深松+旋耕、翻耕>旋耕、深松+条旋耕>条旋耕; 开花期为深松+旋耕、翻耕、深松+条旋耕>旋耕>条旋耕; 成熟期为深松+旋耕、深松+条旋耕>翻耕>旋耕>条旋耕。在拔节之后, 深松+条旋耕和深松+旋耕的小麦干物质积累量显著高于条旋耕和旋耕处理, 表明深松有利于提高小麦拔节至成熟期的干物质积累量和成熟期的干物质积累总量, 拔节至成熟期小麦由营养生长与

生殖生长并进期转入生殖生长期,此时期较高的干物质积累量奠定了籽粒产量形成的基础。深松+条旋

耕的干物质积累量在开花期与深松+旋耕和翻耕处理无显著差异,在成熟期显著高于翻耕处理(图 3)。

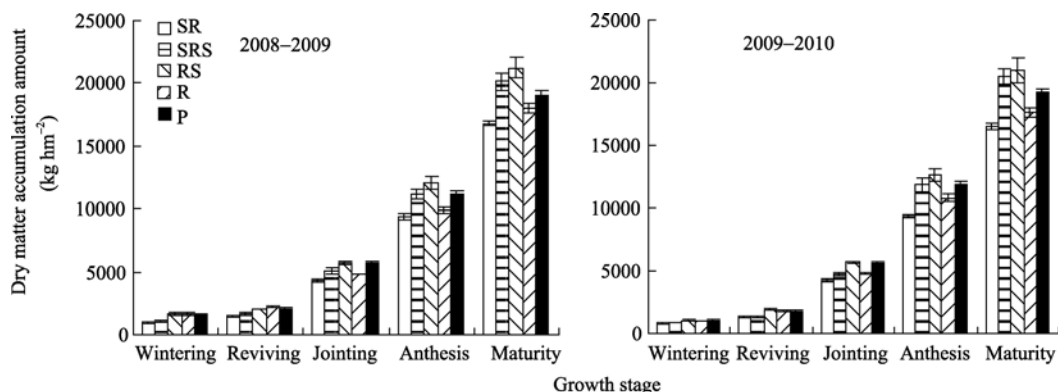


图 3 耕作方式对冬小麦干物质积累量的影响

Fig. 3 Effects of different tillage practices on dry matter accumulation amount in winter wheat

SR: 条旋耕; SRS: 深松+条旋耕; RS: 深松+旋耕; R: 旋耕; P: 翻耕。

SR: strip rotary tillage; SRS: strip rotary tillage after subsoiling; RS: rotary tillage after subsoiling; R: rotary tillage; P: plowing tillage.

2.3.2 成熟期干物质在不同器官中的分配 2 年度试验结果均示出,深松+条旋耕和深松+旋耕的成熟期籽粒的干物质分配量和分配比例分别高于条旋耕和旋耕处理,茎秆+叶鞘+叶片的分配比例分别低于条旋耕和旋耕处理(表 1),表明深松降低了茎秆+叶鞘+叶片的干物质分配比例,提高了籽粒的干物质分配量和比例。翻耕的成熟期茎秆+叶鞘+叶片的干物质分配比例显著高于深松+条旋耕和深松+旋耕处理,籽粒的干物质分配比例低于上述处理,不利

于翻耕处理籽粒产量的提高。穗轴+颖壳的分配比例在 2008—2009 生长季为旋耕、条旋耕、翻耕、深松+旋耕>深松+条旋耕,在 2009—2010 生长季为旋耕、条旋耕、深松+旋耕、深松+条旋耕>翻耕,这与深松+条旋耕处理 2009—2010 生长季茎秆+叶鞘+叶片的分配比例低于 2008—2009 生长季有关。

2.3.3 开花后营养器官干物质再分配及其对籽粒贡献率 两年度试验结果显示,深松+条旋耕和深松+旋耕的开花后干物质积累量和开花后干物质同

表 1 耕作方式对冬小麦成熟期干物质在不同器官中的分配的影响

Table 1 Effects of different tillage practices on dry matter distribution in different organs at maturity in winter wheat

| 处理 Treatment | 总重 Total (g stalk ⁻¹) | 籽粒 Kernel | | 穗轴+颖壳 Spike axis + kernel husk | | 茎秆+叶鞘+叶片 Stem + sheath + leaf | |
|-----------------|---|---------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|
| | | 数量 | 比例 | 数量 | 比例 | 数量 | 比例 |
| | | Amount (g stalk ⁻¹) | Ratio (%) | Amount (g stalk ⁻¹) | Ratio (%) | Amount (g stalk ⁻¹) | Ratio (%) |
| 2008–2009 | | | | | | | |
| 条旋耕 SR | 2.39 d | 1.15 d | 47.86 d | 0.24 c | 10.20 a | 1.00 bc | 41.94 a |
| 深松+条旋耕 SRS | 2.94 a | 1.60 a | 54.55 a | 0.27 ab | 9.09 c | 1.07 a | 36.36 d |
| 深松+旋耕 RS | 2.91 a | 1.59 a | 54.66 a | 0.28 a | 9.64 b | 1.04 ab | 35.71 d |
| 旋耕 R | 2.56 c | 1.31 c | 51.26 c | 0.26 b | 10.29 a | 0.98 c | 38.44 b |
| 翻耕 P | 2.71 b | 1.42 b | 52.46 b | 0.27 ab | 10.02 ab | 1.02 bc | 37.52 c |
| 2009–2010 | | | | | | | |
| 条旋耕 SR | 2.31 d | 1.15 d | 49.81 c | 0.23 d | 9.98 ab | 0.93 c | 40.21 a |
| 深松+条旋耕 SRS | 3.01 a | 1.70 a | 56.55 a | 0.30 a | 9.85 b | 1.01 a | 33.59 c |
| 深松+旋耕 RS | 3.02 a | 1.70 a | 56.19 a | 0.30 a | 10.04 ab | 1.02 a | 33.77 c |
| 旋耕 R | 2.65 c | 1.42 c | 53.56 b | 0.27 b | 10.25 a | 0.96 b | 36.19 b |
| 翻耕 P | 2.80 b | 1.51 b | 53.96 b | 0.26 c | 9.37 c | 1.03 a | 36.67 b |

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5%显著水平。

In each growing season, values followed by different letters within the same column are significantly different at the 5% probability level. SR: strip rotary tillage; SRS: strip rotary tillage after subsoiling; RS: rotary tillage after subsoiling; R: rotary tillage; P: plowing tillage.

表 2 耕作方式对开花后营养器官干物质再分配的影响
Table 2 Effects of different tillage practices on dry matter translocation amount from vegetative organ to grain after anthesis

| 处理 Treatment | 营养器官开花前贮藏同化 物转运量 DMTAA (kg hm ⁻²) | 开花前贮藏同化物转运量 对籽粒的贡献率 CDMTAATG (%) | 开花后干物质积累量 DMAAA (kg hm ⁻²) | 开花后干物质同化量对籽 粒的贡献率 CDMAAATG (%) |
|-----------------|---|--|--|--------------------------------------|
| | | | | |
| 2008—2009 | | | | |
| 条旋耕 SR | 2362.44 a | 31.94 a | 5035.05 d | 68.06 d |
| 深松+条旋耕 SRS | 1565.11 d | 16.28 d | 8048.75 a | 83.72 a |
| 深松+旋耕 RS | 1380.63 e | 14.47 e | 8160.40 a | 85.53 a |
| 旋耕 R | 2044.74 b | 24.94 b | 6152.84 c | 75.06 c |
| 翻耕 P | 1826.75 c | 20.56 c | 7058.28 b | 79.44 b |
| 2009—2010 | | | | |
| 条旋耕 SR | 2321.44 a | 30.92 a | 5185.94 d | 69.08 d |
| 深松+条旋耕 SRS | 1653.62 d | 17.05 e | 8044.80 a | 82.95 a |
| 深松+旋耕 RS | 1978.38 c | 20.21 d | 7808.42 a | 79.79 a |
| 旋耕 R | 2306.02 a | 27.91 b | 5956.05 c | 72.09 c |
| 翻耕 P | 2178.28 b | 24.39 c | 6752.67 b | 75.61 b |

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5%显著水平。

In each growing season, values followed by different letters within the same column are significantly different at the 5% probability level. DMTAA: dry matter translocation amount after anthesis; CDMTAATG: contribution of dry matter translocation amount after anthesis to grain; DMAAA: dry matter accumulation amount after anthesis; CDMAAATG: contribution of dry matter assimilation amount after anthesis to grain. SR: strip rotary tillage; SRS: strip rotary tillage after subsoiling; RS: rotary tillage after subsoiling; R: rotary tillage; P: plowing tillage.

化量对籽粒的贡献率分别高于条旋耕和旋耕处理；营养器官开花前贮藏同化物转运量和开花前贮藏同化物转运量对籽粒的贡献率低于条旋耕和旋耕处理(表 2)。翻耕的开花后干物质积累量和开花后干物质同化量对籽粒的贡献率低于深松+条旋耕和深松+旋耕处理；营养器官开花前贮藏同化物转运量和开花前贮藏同化物转运量对籽粒的贡献率高于深松+条旋耕和深松+旋耕处理。表明深松+条旋耕和深松+旋耕提高了开花后干物质的积累能力，增加了籽粒中来自开花后干物质的比例，这是深松+条旋耕和深松+旋耕处理获得高产的生理基础。

2.4 耕作方式对小麦籽粒产量和水分利用效率的影响

在 3 个小麦生长季中，深松+条旋耕和深松+旋耕的籽粒产量、灌溉效益和水分利用效率均高于条旋耕和旋耕处理；翻耕的籽粒产量和水分利用效率低于深松+条旋耕处理。2007—2008 生长季，深松+条旋耕处理的籽粒产量和水分利用效率与深松+旋耕处理无显著差异。2008—2010 生长季，深松+条旋耕处理的水分利用效率和灌溉效益最高，其籽粒产量与深松+旋耕处理无显著差异，是兼顾高产节水的耕作方式。旋耕和条旋耕处理的籽粒产量、水分利用效率和灌溉效益均低于翻耕处理，条旋耕最低。2007—2008 生长季，各处理水分利用效率表现

为深松+条旋耕、深松+旋耕>翻耕、旋耕>条旋耕，在 2008—2009 和 2009—2010 生长季则表现为深松+条旋耕>深松+旋耕、翻耕>旋耕>条旋耕，表明在一年深松作业的基础上进行两年度的条旋耕，显著提高了小麦的水分利用效率(表 3)。

3 讨论

土壤贮水是冬小麦水分的重要来源^[21]，随灌水量增加冬小麦土壤贮水特别是深层贮水消耗量相应减少^[22]。有研究表明，免耕能改善土壤结构，提高土壤含水量^[2,23]，比传统翻耕增加土壤蓄水量 10%^[24]。旋耕和耙耕处理土壤的蓄水保墒能力高于翻耕，有利于提高土壤在小麦生育后期的供水能力^[25]。本试验结果表明，在一年深松基础上的深松+条旋耕处理，深松后两年 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量与深松+旋耕处理无显著差异，在 40~160 cm 各土层的土壤贮水消耗量均高于翻耕处理，在 0~40 cm 和 160~200 cm 各土层的土壤贮水消耗量与翻耕处理无显著差异。连续 3 年度条旋耕处理的 0~200 cm 土层的土壤贮水消耗量最低；其 120~200 cm 各土层的土壤贮水消耗量显著低于其他处理，不利于小麦对深层土壤水分的利用。此外，深松+条旋耕处理各生育时期的株间蒸发量低于深松+旋耕和翻耕处理，减少了土壤水分向大气中的耗散，有利于降

表 3 耕作方式对籽粒产量和水分利用率的影响
Table 3 Effects of different tillage practices on grain yield and water use efficiency

| 处理 Treatment | 农田耗水量 Water consumption amount (mm) | 籽粒产量 Grain yield (kg hm ⁻²) | 水分利用率 Water use efficiency (kg hm ⁻² mm ⁻¹) | 无灌溉籽粒产量 Grain yield of no irrigation (kg hm ⁻²) | 灌溉效益 Irrigation benefit (kg hm ⁻² mm ⁻¹) |
|-----------------|---|---|--|---|---|
| 2007–2008 | | | | | |
| 条旋耕 SR | 425.22 b | 7608.45 c | 17.89 c | 6535.38 c | 16.88 c |
| 深松+条旋耕 SRS | 453.70 a | 9409.01 a | 20.74 a | 7767.14 a | 20.47 b |
| 深松+旋耕 RS | 437.39 a | 9194.65 a | 21.02 a | 7950.28 a | 22.10 a |
| 旋耕 R | 449.05 a | 8538.93 b | 19.02 b | 7334.14 b | 17.16 c |
| 翻耕 P | 453.47 a | 8578.20 b | 18.92 b | 7402.37 b | 19.03 b |
| 2008–2009 | | | | | |
| 条旋耕 SR | 402.03 d | 7397.48 d | 18.40 d | 6601.38 c | 11.18 e |
| 深松+条旋耕 SRS | 449.52 b | 9613.86 a | 21.39 a | 7442.07 a | 26.38 a |
| 深松+旋耕 RS | 476.48 a | 9541.03 a | 20.02 b | 7341.43 a | 21.87 b |
| 旋耕 R | 424.81 c | 8197.58 c | 19.30 c | 7011.60 b | 12.74 d |
| 翻耕 P | 446.39 b | 8885.03 b | 19.90 b | 7017.11 b | 17.44 c |
| 2009–2010 | | | | | |
| 条旋耕 SR | 381.08 e | 7507.38 d | 19.70 d | 6595.51 c | 12.79 e |
| 深松+条旋耕 SRS | 439.11 b | 9698.42 a | 22.09 a | 7683.73 a | 25.93 a |
| 深松+旋耕 RS | 466.03 a | 9786.80 a | 21.00 b | 7663.43 a | 21.39 b |
| 旋耕 R | 406.73 d | 8262.07 c | 20.31 c | 6962.18 b | 14.41 d |
| 翻耕 P | 427.20 c | 8930.95 b | 20.91 b | 7070.08 b | 17.68 c |

同列中不同小写字母表示在同一生长季内差异达 5%显著水平。

In each growing season, values followed by different letters within the same column are significantly different at the 5% probability level. SRS: strip rotary tillage after subsoiling; RS: rotary tillage after subsoiling; R: rotary tillage; P: plowing tillage.

低农田耗水量。

不同耕作方式通过改善耕作层土壤水分条件,提高了小麦干物质积累能力。有研究表明,深松和秸秆覆盖提高了小麦开花后干物质积累量和在穗部的分配比例^[26],但亦有研究指出,免耕秸秆覆盖主要是增加植株中总干物质的积累量,对于干物质在不同器官中的分配比例无显著影响^[27]。本试验结果表明,深松+条旋耕和深松+旋耕处理开花后的干物质积累量、成熟期籽粒的干物质分配量及分配比例和开花后干物质同化量对籽粒的贡献率均高于其他处理,说明深松有利于提高开花后干物质积累和光合产物向籽粒的分配,这是深松+条旋耕和深松+旋耕处理获得高产的生理基础。条旋耕和旋耕处理在开花后的干物质积累量和成熟期籽粒的干物质分配量及分配比例均低于翻耕处理,条旋耕处理最低,这是条旋耕处理籽粒产量显著低于其他耕作方式的原因。

关于不同耕作方式对小麦产量和水分利用效率的影响, Ghuman 等^[28]和周兴祥等^[29]研究认为,少耕覆盖和免耕覆盖可以提高小麦产量 7.2%~18.4%;

Hao 等^[30]研究指出,少免耕秸秆还田对产量无显著影响。免耕的水分利用效率在多雨年份比传统翻耕低 24.1%,而在少雨年份仅低 3.2%^[31]。多年免耕导致土壤压实,容重增大,产量降低^[12],土壤深松可降低土壤容重,破除土壤板结^[32],提高作物产量和水分利用效率^[13,33]。本试验结果表明,在一年深松基础上的深松+条旋耕和深松+旋耕处理,其籽粒产量、水分利用效率和灌溉效益均高于条旋耕和旋耕处理的,说明深松对提高籽粒产量和水分利用效率有重要作用。深松+条旋耕与深松+旋耕处理相比,产量无显著差异,但在一年深松作业的基础上连续 3 年使用 2BLMFS-8-4-3 型多功能贴茬播种机播种,可一次性完成播种行条旋耕、施底肥、播种、起畦作业,减少了耕作整地的工序,该耕作方式有推广价值,关于深松的后效作用持续时间有待于进一步研究。

4 结论

深松对提高籽粒产量和水分利用效率有重要作用。深松+条旋耕和深松+旋耕处理开花后的干物质

积累量、成熟期籽粒的干物质分配量及分配比例和开花后干物质同化量对籽粒的贡献率均高于其他处理; 深松+条旋耕有利于小麦对深层土壤水分的利用, 并减少了土壤水分向大气中的耗散, 降低农田耗水量, 有利于开花后干物质积累和光合产物向籽粒的分配, 这是其获得高产和高水分利用效率的理论基础。

References

- [1] De Vita P, Di Paolo E, Fecondo G, Di Fonzo N, Pisante M. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil Till Res*, 2007, 92: 69–78
- [2] 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)
- [3] Holland J M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agric Ecosyst Environ*, 2004, 103: 1–25
- [4] Riley H C F, Bleken M A, 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 Till Res*, 2005, 80: 79–93
- [5] Zheng C-Y(郑成岩), Yu Z-W(于振文), Ma X-H(马兴华), Wang X-Z(王西芝), Bai H-L(白洪立). Water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2008, 34(8): 1450–1458 (in Chinese with English abstract)
- [6] Wu J-Z(吴金芝), Huang M(黄明), Li Y-J(李友军), Chen M-C(陈明灿), Yao Y-Q(姚宇卿), Guo D-Y(郭大勇), Huang H-X(黄海霞). Effects of different tillage systems on the photosynthesis functions, grain yield and WUE in winter wheat. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2008, 26(5): 17–21 (in Chinese with English abstract)
- [7] Huang M(黄明), Wu J-Z(吴金芝), Li Y-J(李友军), Yao Y-Q(姚宇卿), Zhang C-J(张灿军), Cai D-X(蔡典雄), Jin K(金轲). Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2009, 25(1): 50–54 (in Chinese with English abstract)
- [8] Zhao J-B(赵聚宝), Mei X-R(梅旭荣), Xie J-H(谢军红). The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 1996, 29(2): 59–66 (in Chinese with English abstract)
- [9] Li Y-J(李友军), Wu J-Z(吴金芝), Huang M(黄明), Yao Y-Q(姚宇卿), Zhang C-J(张灿军), Cai D-X(蔡典雄), Jin K(金轲). Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2006, 22(12): 44–48 (in Chinese with English abstract)
- [10] Su Z Y, Zhang J S, Wu W L, Cai D X, Lu 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
- [11] Fabrizzi K P, Garcia F O, Costa J L, Picone L I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till Res*, 2005, 81: 57–69
- [12] Borghei A M, Taghinejad J, Minaei S, Karimi M, Varnamkhasti M G. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest of Iran. *Int J Agri Biol*, 2008, 10: 120–123
- [13] Lü M-R(吕美蓉), Li Z-J(李增嘉), Zhang T(张涛), Ning T-Y(宁堂原), Zhao J-B(赵建波), Li H-J(李洪杰). Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2010, 26(1): 41–46 (in Chinese with English abstract)
- [14] Shan L(山仑), Kang S-Z(康绍忠), Wu P-T(吴普特). *Water Saving Agriculture in China* (中国节水农业). Beijing: China Agriculture Press, 2004. pp 229–230 (in Chinese)
- [15] Liu Z-J(刘增进), Li B-P(李宝萍), Li Y-H(李远华), Cui Y-L(崔远来). Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2004, 20(4): 58–63 (in Chinese with English abstract)
- [16] Du T-S(杜太生), Kang S-Z(康绍忠), Hu X-T(胡笑涛), Yang X-Y(杨秀英). Effect of alternate partial root-zone drip irrigation on yield and water use efficiency of cotton. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2005, 38(10): 2061–2068 (in Chinese with English abstract)
- [17] Hou L-T(侯连涛), Jiang X-D(江晓东), Han B(韩宾), Jiao N-Y(焦念元), Zhao C(赵春), Li Z-J(李增嘉). Effects of different mulching treatments on the gas exchange parameters and water use efficiency of winter wheat. *Trans CSAE* (农业工程学报),

- 2006, 22(9): 58–63 (in Chinese with English abstract)
- [18] Wang J-S(王建生), Xu Z-K(徐子恺), Yao J-W(姚建文). Analysis of food throughput per unit water use. *Adv Water Sci* (水科学进展), 1999, 10(4): 429–434 (in Chinese with English abstract)
- [19] Sun H-Y(孙宏勇), Liu C-M(刘昌明), Zhang Y-Q(张永强), Zhang X-Y(张喜英). Study on soil evaporation by using microlysimeter. *J Hydraulic Eng* (水利学报), 2004, (8): 114–118 (in Chinese with English abstract)
- [20] Jiang D(姜东), Xie Z-J(谢祝捷), Cao W-X(曹卫星), Dai T-B(戴廷波), Jing Q(荆奇). Effects of post-anthesis drought and waterlogging on photosynthetic characteristics, assimilates transportation in winter wheat. *Acta Agron Sin* (作物学报), 2004, 30(2): 175–182 (in Chinese with English abstract)
- [21] Zhou L-Y(周凌云). Water consumption and water use efficiency of wheat field in Fengqiu region. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1995, 6(suppl): 57–61 (in Chinese with English abstract)
- [22] Oweis T, Zhang H, Pala M. Water use efficiency of rainfed and irrigation bread wheat in a Mediterranean environment. *Agron J*, 2000, 92: 231–238
- [23] Wang X B, Cai D X, Hoogmoed W B, Oenema O, Perdok U D. Potential effect of conservation tillage on sustainable land use: a review of global long-term studies. *Pedosphere*, 2006, 16: 587–595
- [24] Zhang H-L(张海林), Chen F(陈阜), Qin Y-D(秦耀东), Zhu W-S(朱文珊). Water consumption characteristics for summer corn under no-tillage with mulch. *Trans CSAE*, 2002, 18(2): 36–40 (in Chinese with English abstract)
- [25] Jiang X-D(江晓东), Li Z-J(李增嘉), Hou L-T(侯连涛), Wang Y(王芸), Wang X(王雪), Yan H(颜红). Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO_3^- -N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivations. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2005, 21(7): 20–24 (in Chinese with English abstract)
- [26] Huang M(黄明), Wu J-Z(吴金芝), Li Y-J(李友军), Yao Y-Q(姚宇卿), Zhang C-J(张灿军), Cai D-X(蔡典雄), Jin K(金珂). Effects of tillage pattern on the flag leaf senescence and grain yield of winter wheat under dry farming. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2009, 20(6): 1355–1361 (in Chinese with English abstract)
- [27] Chen L-M(陈乐梅), Ma L(马林), Liu J-X(刘建喜), Shi S-B(石书兵), Guo F(郭飞), Ku Z-L(库再拉), Lin S-Q(蔺胜权). The effect of no-tillage with stubble on the dynamic change of dry matter accumulation and yield of spring wheat during grain filling. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, 24(6): 21–24 (in Chinese with English abstract)
- [28] Ghuman B S, Sur H S. Tillage and residue management effects on soil properties and yields of rainfed maize and wheat in a subhumid subtropical climate. *Soil Till Res*, 2001, 58: 1–10
- [29] Zhou X-X(周兴祥), Gao H-W(高焕文), Li X-F(刘晓峰). Experimental study on conservation tillage system in areas of two crops a year in North China Plain. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2001, 17(6): 841–843 (in Chinese with English abstract)
- [30] Hao X, Chang C, Conner R L, Bergen P. Effect of minimum tillage and crop sequence on crop yield and quality under irrigation in a southern Alberta clay loam soil. *Soil Till Res*, 2001, 59: 45–55
- [31] Singh B, Chanasyk D S, McGill W B. Soil water regime under barley with long-term tillage-residue systems. *Soil Till Res*, 1998, 45: 59–74
- [32] Du B(杜兵), Li W-Y(李问盈), Deng J(邓健), Liao Z-X(廖植樨). Research on surface tillage in conservation tillage. *J China Agric Univ* (中国农业大学学报), 2000, 5(4): 65–67 (in Chinese with English abstract)
- [33] Qin H-L(秦红灵), Gao W-S(高旺盛), Ma Y-C(马月存), Ma L(马丽), Yin C-M(尹春梅). Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2008, 41(1): 78–85 (in Chinese with English abstract)