植物营养与肥料学报 2015,21(2): 296 - 305 doi: 10.11674/zwyf.2015.0203
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响

王健波, 严昌荣, 刘恩科*, 陈保青, 张恒恒
(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】小麦开花后光合特性对干物质积累和转运具有重要作用,而土壤水分是影响作物光合作用最重要的环境因子。研究长期定位试验条件下免耕覆盖的蓄水保墒作用和小麦冠层光合有效辐射传输特征,及其对小麦光合特性和干物质转运规律的影响,以期为旱区作物生产及农田高效用水提供理论依据。**【方法】**本文以山西临汾20年免耕覆盖和常规耕作两种耕作方式的长期定位试验为平台,于2013年休闲期和小麦生育期对土壤水分,小麦生育后期光合有效辐射、旗叶光合参数、干物质积累和产量构成因素进行了测定。**【结果】**在休闲期和小麦生育期,与常规耕作方式相比,免耕覆盖耕作0—160 cm土层土壤储水量显著增加,平均提高了12%,其中在土壤水分含量的最低时期(灌浆前期)比常规耕作提高21%($P<0.01$)。在抽穗和灌浆前期免耕覆盖处理的小麦截获的光合有效辐射比常规耕作高163 μmol/(m^2·s),其中在灌浆前期二者差异最大,达19.3%($P<0.05$),并且免耕覆盖下小麦中上层和中下层都有充分利用光能的机会。在灌浆前期免耕覆盖比常规耕作处理的小麦旗叶气孔导度平均增加39%,二氧化碳利用能力平均增加11%,瞬时水分利用效率提高了22%;小麦抽穗后到成熟期免耕覆盖处理的小麦旗叶净光合速率平均比常规耕作高39%,收获期籽粒重和植株总重分别比常规耕作高57%和46%($P<0.01$),并且开花后干物质积累量对籽粒的贡献率达到了64%。从产量构成因素来看,免耕覆盖的小麦穗数和千粒重分别比常规耕作高31%和10%,实收产量比常规耕作高41%($P<0.01$)。免耕覆盖耕作方式下的土壤蓄水保墒能力缓解了因水分胁迫作用而出现的光合午休现象,保证了小麦光合速率处于较高水平;同时免耕覆盖增强了小麦开花后干物质的积累能力,并且籽粒干物质的主要来源是开花后干物质的积累,而常规耕作则是以开花前贮藏的同化物量为主要来源。**【结论】**在晋南旱区,采用长期免耕覆盖的耕作方式可提高土壤水分的保蓄能力和光能截获能力,增强冬小麦的净光合效率、瞬时水分利用效率及干物质积累与转运,协调产量构成因素之间的关系,提高小麦产量。

关键词: 旱地小麦; 免耕覆盖; 光合有效辐射; 土壤水分; 干物质积累与转运; 光合特性
中图分类号: S345; S512.1.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0296-10

Effects of long-term no-tillage with straw mulch on photosynthetic characteristics of flag leaues and dry matter accumulation and translocation of winter wheat in dryland

WANG Jian-bo, YAN Chang-rong, LIU En-ke*, CHEN Bao-qing, ZHANG Heng-heng
(*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS/ Key Laboratory of Dry Land Agriculture, MOA, Beijing 100081, China*)

Abstract:【Objectives】 Photosynthetic characteristics of winter wheat after flowering play an important role in dry matter accumulation and transportation, and soil moisture is the most important environmental factor which affects the crop photosynthesis. Application of no-tillage could improve the soil environment and increase the crop production. To study role of water reserving and soil moisture keeping under no-tillage with straw mulch practice in

收稿日期: 2014-03-10 **接受日期:** 2014-06-09
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2013AA102902-2);国家"十二五"科技支撑计划(2012BAD09B01);国家自然科学基金项目(31170490, 31000253)资助。
作者简介: 王健波(1986—),男,山东枣庄人,博士研究生,主要从事旱地农业研究。E-mail: wangjianbo2004@126.com
* 通信作者 Tel: 010-82109773, E-mail: liuenke@caas.cn

a long-term experiment, and transfer characteristics of canopy photosynthetically active radiation and their effects on photosynthetic characteristics and dry matter transportation of wheat, we conducted this experiment in the long-term plots. 【**Methods**】These plots were established in a silt loam soil in the Loess Plateau of China in 1992, and consisted of no-tillage with straw mulch (NT) and conventional tillage (CT) with three replications. The soil of this semi-arid area is a Chromic Cambisol, which is low in organic matter and slightly alkaline and which is subject to frequent drying and wetting cycles. The soil moisture, and photosynthetically active radiation, flag leaf photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and yield components of wheat were measured during the fallow period and wheat-growing period under different tillage practices. 【**Results**】During the fallow period and wheat-growing period, a significant increase of water-storage capacity under the NT practice is found in 0-160 cm soil depth compared with CT, with an average increase of 12%. At its lowest point (at the pre-filling stage), soil moisture under the NT practice is 21% higher than that of the CT practice ($P < 0.01$). The canopy photosynthetically active radiation intercepted under the NT practice is 163 μmol/(m^2 · s) higher than that of the CT practice at the heading and filling stages, which reaches the maximum difference (19.3%) at the pre-filling stage ($P < 0.05$), and both upper and bottom wheat canopies under the NT practice have opportunity to use light energy. Compared with the CT practice, the NT practice increases the stomatal conductance with an average of 39% at the pre-filling stage, enhances the ability of carbon dioxide utilization by 11%, and improves WUE by 22%. From the heading to mature stages, the net photosynthesis rate under the NT practice is 39% higher than that of CT, the grain weight and total plant weight at the harvest stage are 57% and 46% higher than those of CT respectively ($P < 0.01$), and the contribution of dry matter accumulation into grain after the flowering reaches 64%. From the point of view of yield components, the NT practice had the significant effect on wheat spike number and thousand grain weights, 31% and 10% higher than the CT practice respectively. The yield under the NT practice was 41% higher than the CT practice ($P < 0.01$). The study indicates that the ability of water reserving and soil moisture keeping under no-tillage with straw mulch practice could alleviate the decline of net photosynthesis rate in midday due to the action of water stress, and keep wheat photosynthesis at a high level. Meanwhile, the NT practice enhances the ability of dry matter accumulation after the anthesis, and the dry matter accumulation after the anthesis is the main source of dry matter accumulation into grain under the NT practice, while under the CT practice the dry matter accumulated in vegetative organs before the anthesis is the main source of dry matter accumulation into grain. 【**Conclusions**】The results indicate that the long-term no-tillage with straw mulch practice could significantly improve soil moisture and light interception ability, enhance wheat photosynthesis characteristics, WUE and dry matter accumulation and transportation, coordinate relationship between the yield components and increase wheat production in the dryland of the south of Shanxi Province.

Key words: rainfed wheat; no-tillage; PAR; soil moisture; dry matter accumulation and translocation; photosynthetic characteristics

光合作用为作物的生长发育提供了物质基础。土壤水分是影响作物光合作用最重要的环境因子,对作物的干物质积累和转运有着决定性的作用。北方旱区缺水少雨且降水集中,造成该区旱灾频繁;同时农田土壤的翻耕及秸秆还田少,造成土壤贫瘠和土壤退化,原本生态环境脆弱的旱作区又进一步加剧并恶化,严重制约了旱地农业的发展[1-2]。因此,采取保护性耕作的方式改善土壤质量,提高土壤蓄水能力,进而达到作物高效用水的目的,可为农业发展提供可靠保障。

小麦花后光合性能对干物质积累和转运具有重要作用。前人研究表明,作物光合作用除了受内部遗传因素的影响外,同时还受到外部环境条件的限制,对于北方旱作农田系统土壤水分是最重要的限制因子之一。然而耕作方式的转换通常会对土壤环境产生重大影响,进而影响作物的光合特性。王维等[3]研究表明,2 年免耕秸秆留茬处理与翻耕相比显著提高了旱地小麦花后的光合能力。侯贤清等[4]在宁南旱区通过 4 年定位试验研究,表明免耕与深松相结合的耕作方式显著提高了小麦旗叶日均

净光合速率。王靖等[5]的研究表明,保护性耕作有利于延长旱地小麦花后光合功能期,增强籽粒灌浆速率,提高小麦产量。吴金芝等[6]的研究结果显示,免耕覆盖能改善小麦生育后期旗叶的光合性能,促进干物质积累,产量比常规耕作提高10.22%。然而也有的研究得到不同的结论。江晓东等[7]研究表明,免耕覆盖处理开花期的小麦光合速率显著高于常规耕作和秸秆还田,但在灌浆期和灌浆末期这种差距逐渐减少且差异不显著。李友军等[8]发现小麦灌浆中期的净光合速率免耕覆盖低于常规耕作,而在灌浆后期其净光合速率则比常规耕作高14.7%,产量增加19.3%。因此,免耕覆盖对作物光合作用的影响尚需进一步深入研究。

目前,对保护性耕作条件下作物光合作用的研究多基于短期的免耕覆盖试验,或集中于光合日变化方面,而对长期定位试验中从免耕覆盖的蓄水保墒作用及作物光能截获的角度研究作物光合特性及干物质积累与转运规律的报道还很少。为此,本文以晋南旱区20年免耕覆盖定位试验为平台,通过测定小麦生育后期土壤水分和不同冠层光合有效辐射,系统研究了免耕覆盖条件下小麦旗叶光合速率的动态变化、光合日变化及干物质积累与转运规律,以期为旱区作物生产及农田高效用水提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期定位试验始于1992年,位于山西省临汾市(111°62′89″E,36°02′96″N,海拔550 m)。年平均气温10.7°C,无霜期180 d。该地区主要以半干旱气候为主,年平均降水量为555 mm,主要集中在7～9月份(图1),旱季会发生严重的干旱。土壤为肉桂黄土,有机质含量低,略偏碱性。根据美国土壤分类系统,土壤属于粉砂壤土。试验地初始土壤有机碳含量13.0 g/kg,全氮0.50 g/kg,全磷0.15 g/kg,全钾12 g/kg,pH 7.7。

1.2 试验设计

长期定位试验设常规耕作(CT)和免耕覆盖耕作(NT)2种耕作方式。常规耕作方式为翻耕且秸秆不还田,但收获后留有10～15 cm根茬,耕作深度为20 cm左右。免耕覆盖为不进行耕作,前茬小麦秸秆全部还田覆盖于地表。每处理3次重复,小区面积330 m^2(6.6 m×50 m),随机区组排列。小麦在每年9月底播种,次年6月中旬收获。收获后

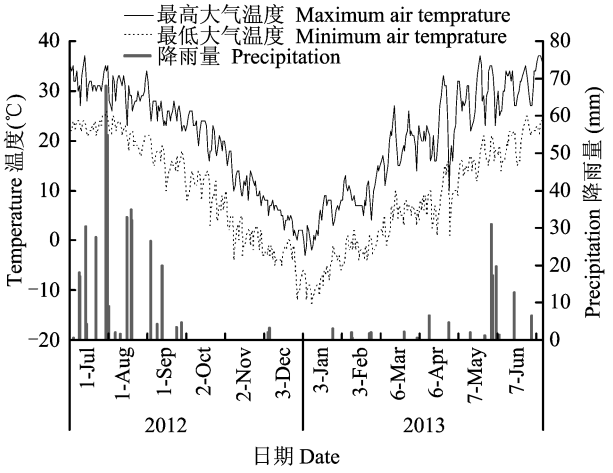

图1 2012～2013年试验区休闲期和冬小麦生育期温度与降雨量分布

Fig.1 Air temperature and precipitation during the fallow and wheat-growing periods in 2012-2013

一直到9月底为休闲期,同时用灭草剂控制杂草。冬小麦品种为临汾225,播种量225 kg/hm^2。氮、磷、钾肥料用量为N 150 kg/hm^2、P_2O_5 140 kg/hm^2、K_2O 62 kg/hm^2,以尿素、磷酸氢二铵和氯化钾为主,在小麦播种时一次性随播种机施入。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分测定 在休闲期和小麦生育期使用时域反射仪(TDR)测定土壤含水量,测定深度分别为0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm、100—120 cm、120—140 cm、140—160 cm。

土壤储水量计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^{n} Q_i \times h_i \times 10$$

式中:H为土壤贮水量,单位mm;Q_i为第i层土壤体积含水量,用%表示;h_i为第i层土壤厚度,单位为cm;10是将cm换算成mm;i为测土壤体积含水量时的层序,i从1到8分别表示每20 cm的土壤深度[9]。

1.3.2 光合指标测定 每个试验小区选取5株有代表性、长势一致的植株挂牌标记,采用Li-6400便携式光合作用测定系统(Li-Cor公司,美国)测定冬小麦抽穗期(2013-04-24)、灌浆前期(2013-05-11)、灌浆后期(2013-05-20)及成熟期(2013-05-27)旗叶的光合速率,其中测定灌浆前期光合速率、气孔导度、胞间CO_2浓度和蒸腾速率的日变化,并计算叶片气孔限制值(Ls=1-Ci/Ca),瞬时水分利用效率(WUE=Pn/Tr)[10]。

1.3.3 光合有效辐射　用 SUNSCAN 冠层分析仪(Delta 公司,英国)测定小麦抽穗期、灌浆前期及成熟期冠层光合有效辐射。冠层截获的光合有效辐射(IPAR)可用冠层上下光合有效辐射量之差计算[11]:

IPAR = TPAR - BPAR

式中:TPAR 为冠层上部的总光合有效辐射;BPAR 为冠层底部的光合有效辐射。

为减少测量误差,选择晴天无风天气,测量时间控制在上午 9:00～11:00 左右[12]。

1.3.4 小麦干物重　于开花期(2013-05-02)和成熟期进行群体调查和取样,每个小区随机取长度为 50 cm 地上部植株,开花期分为叶片、茎秆 + 叶鞘和穗 3 个部分,成熟期分为籽粒、叶片、茎秆 + 叶鞘和颖壳 + 穗轴 4 部分。各时期样品于 105℃ 杀青,75℃ 烘干至恒重,测定干物重。计算公式[13-14]如下:

营养器官开花前贮藏同化物转运量 = 开花期植株干重 - 成熟期营养器官干重;

营养器官开花前贮藏同化物转运率(%) = 营养器官开花前贮藏同化物转运量/开花期植株干重 ×100;

营养器官开花前贮藏同化物对籽粒产量的贡献率(%) = 营养器官开花前贮藏同化物转运量/成熟期籽粒干重 ×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同化物转运量;

开花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率(%) = 开花后同化物输入籽粒量/成熟期籽粒干重 ×100。

1.4　数据处理

试验数据用 Excel 2003 和 Sigmaplot 12.0 进行处理,用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析,采用最小显著差法进行处理间的多重比较($P < 0.05$)。

2　结果与分析

2.1　不同耕作方式对休闲期和小麦生育期土壤水分的影响

免耕覆盖耕作方式与常规耕作相比土壤 0—160 cm 储水量($P < 0.05$)显著增加,休闲期(0～100 d)土壤储水量呈增大趋势,而从小麦播种后到收获期,土壤储水量呈先降低后升高的趋势(图 2),这与降水和小麦水分利用密切相关。在小麦抽穗期(313 d)和灌浆前期(331 d)储水量降低,这是因为小麦用水关键时期,蒸腾蒸发强度达到小麦生育期最大值(数据未发表)并且无降水,随着 2013 年 5 月 22 日的降雨过程(图 1),成熟期(346 d)和收获期(361 d)土壤水分逐渐升高。在整个休闲期和小麦生育期,免耕覆盖比常规耕作平均提高土壤储水量 12%,其中在土壤水分处于最低时期(灌浆前期)比常规耕作提高 21%($P < 0.01$),说明免耕覆盖能够提高土壤储水量,起到蓄水保墒的作用,尤其是在干旱时期其保水作用明显,可为作物干物质积累提供保障。

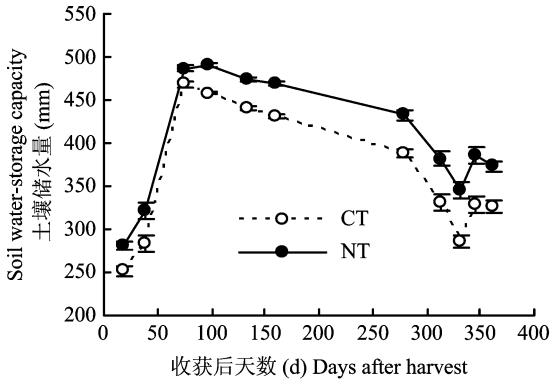

图 2　不同耕作方式下冬小麦收获后 0—160 cm 土层土壤储水量

Fig. 2　Soil water-storage capacities in 0-160 cm depths under different tillage practices after winter wheat harvest

[注(Note):CT—常规耕作 Conventional tillage;NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch.]

2.2　不同耕作方式对小麦冠层光合有效辐射的影响

小麦生育后期冠层光合有效辐射有相同的变化趋势,均呈随着小麦高度的降低光合有效辐射逐渐降低的趋势,但是不同时期间存在一定差异(图 3)。从抽穗期到成熟期小麦上部表现为先减小后增大,中下部则表现为逐渐增大的趋势,但上部差异比下部差异小[分别为 230 和 580 μmol/(m^2 · s)],这与光合有效辐射日变化和小麦叶面积指数等密切相关[11]。

从抽穗期到成熟期小麦冠层截获的总光合有效辐射(IPAR)呈现出降低趋势(斜率越大,截获量越小),在抽穗和灌浆前期免耕覆盖比常规耕作的 IPAR 大 163 μmol/(m^2 · s),在成熟期则略小于常规耕作;其中在灌浆前期二者差异最大,达 19.3%,

差异显著($P<0.05$)。这说明免耕覆盖方式下小麦生长发育关键时期的光能截获量大于常规耕作,为光合作用提供了有利条件,同时也为干物质积累打下了良好的基础。

小麦冠层截获的光合有效辐射(IPAR)不同层次间表现不同,常规耕作方式 IPAR 主要集中在 30～60 cm 处,而免耕覆盖方式的 IPAR 则随着生育期的推进最大值逐渐下移;在抽穗期免耕覆盖方式中上部的 IPAR 大于常规耕作,而在灌浆前期和成熟期中下部的 IPAR 则大于常规耕作,说明免耕覆盖下小麦各层次都有充分利用光能的机会,这与不同时期小麦冠层结构的变化有密切关系[15]。

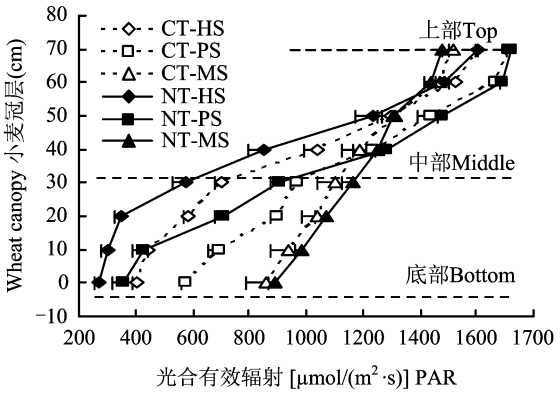

图3 不同耕作方式下冬小麦生育后期冠层光合有效辐射

Fig. 3 Canopy photosynthetically active radiation under different tillage practices during the late wheat-growing period

[注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch; HS—抽穗期 Heading stage; PS—灌浆前期 Pre-filling stage; MS—成熟期 Mature stage.]

2.3 不同耕作方式对小麦旗叶光合参数日变化的影响

统计分析表明,不同耕作方式对小麦旗叶净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)和气孔限制值(Ls)的影响达到极显著水平($P<0.01$)。小麦旗叶 Pn 的日变化基本呈单峰曲线,双峰曲线不明显(图4),上午10:00左右旗叶 Pn 达最大值,免耕覆盖(NT)和常规耕作(CT)分别为 CO_2 22.5和20.5 μmol/(m²·s),此后一直降低,呈"一睡不起型"的光合午休状态。从上午10:00到下午14:00,NT 和 CT 处理下小麦旗叶的 Pn 下降幅度分别达47%和73%,说明免耕覆盖耕作方式能够提高小麦旗叶的净光合速率,并且有利于维持小麦旗叶光合强度处于较高水平。

小麦旗叶气孔导度(Gs)与净光合束率(Pn)的变化趋势基本一致,呈现单峰曲线。上午随着光合辐射强度的升高,Gs 增大,但随着温度的持续升高和蒸腾作用逐渐增强,Gs 开始降低,而且免耕覆盖

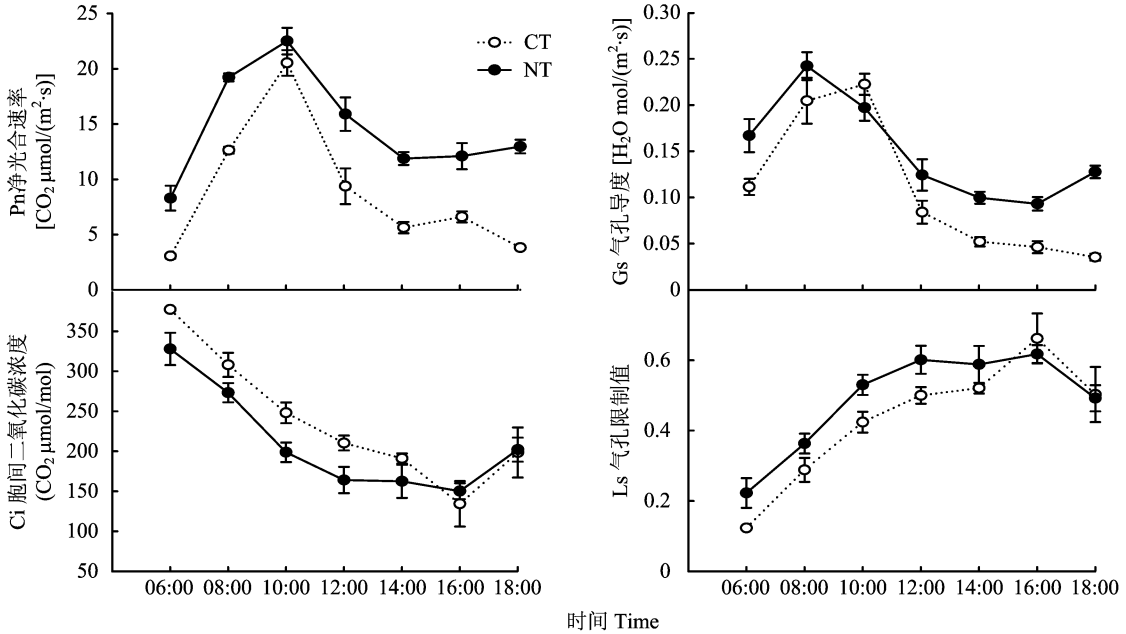

图4 不同耕作方式下冬小麦灌浆前期净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和气孔限制值的日变化

Fig. 4 Effects of different tillage practices on diurnal variations of net photosynthesis rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO_2 concentration (Ci) and stomatal limitation value (Ls) of winter wheat at the pre-filling stage

[注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch.]

比常规耕作 Gs 降低提前,但午后降低幅度较小,这与蒸腾作用和土壤含水量有密切关系,同时说明免耕覆盖方式有利于水分和 CO_2 等通过气孔进行交换。

小麦旗叶的胞间 CO_2 浓度(Ci)随着时间的推进呈降低趋势,下午 16: 00 后略有升高,而气孔限制值(Ls)的日变化规律与 Ci 相反。免耕覆盖方式的 Ci 平均比常规耕作小 11%,差异达显著水平;但到 16: 00 后比常规耕作略有增加,差异不显著。说明免耕覆盖可以增强小麦叶片的光合作用,提高叶片对胞间 CO_2 的利用能力,使胞间 CO_2 的浓度降低。

2.4　不同耕作方式对小麦蒸腾速率和瞬时水分利用的影响

小麦蒸腾速率(Tr)的日变化呈先升高后降低的趋势(图 5)。在上午 6: 00 到 10: 00,Tr 快速升高,10: 00 达到最高值,免耕覆盖方式大于常规耕作,10: 00 之后 Tr 降低,但常规耕作降低幅度大于免耕覆盖,差异达显著水平。这可能是因为高蒸腾速率导致小麦供水不足,气孔部分关闭,蒸腾速率呈降低趋势,但免耕覆盖方式的土壤储水量大于常规耕作(图 2),水分胁迫较小,所以 Tr 降低幅度小,这与午后气孔的部分恢复有关(图 4)。

植物叶片的净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)的比值,代表了瞬间 CO_2 同化作用与水分消耗的关系,即瞬时水分利用效率(WUE)[16]。小麦 WUE 的日变化呈现出先升高后降低的趋势,在 14: 00 达到最低值,随后略有升高。与常规耕作相比,免耕覆盖方式的 WUE 提高了 22%,其中在 06: 00～08: 00,免耕覆盖方式下的 WUE 比常规耕作大 74%,差异达显著水平,但 10: 00 之后两处理间差异不显著,这主要是因为免耕覆盖在增强光合作用的同时,小麦叶片的蒸腾作用也过于旺盛。

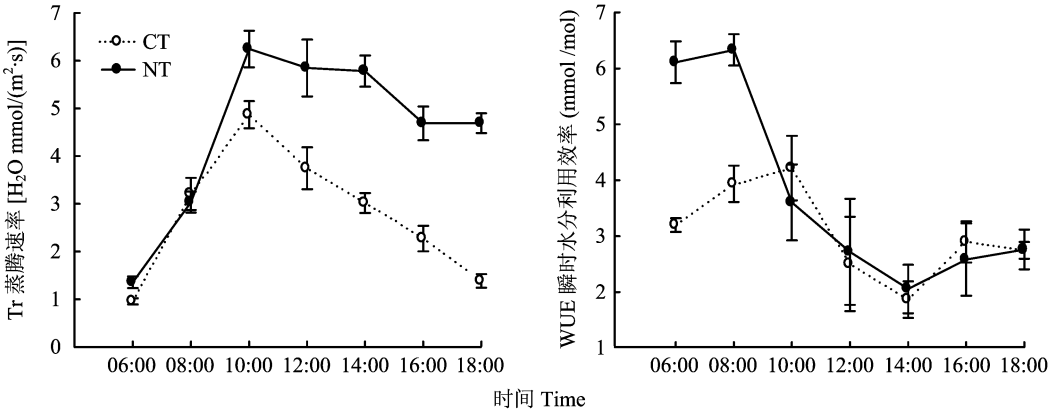

图 5　不同耕作方式下冬小麦灌浆前期蒸腾速率和瞬时水分利用效率日变化

Fig. 5　Effects of different tillage practices on diurnal variations of transpiration rate (Tr) and water use efficiency (WUE) of winter wheat at the pre-filling stage

[注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch.]

2.5　不同耕作方式对小麦生育后期光合特性的影响

从图 6 可以看出,小麦生育后期旗叶光合速率呈先升高后降低的趋势。不同耕作方式对小麦旗叶净光合速率(Pn)的影响显著($P < 0.05$)。免耕覆盖方式的 Pn 平均比常规耕作高 39%,其中在小麦灌浆后期和成熟期常规耕作的 Pn 降低幅度最大,在成熟期,与免耕覆盖相比,常规耕作方式下的小麦叶片基本变黄,这说明免耕覆盖不但可以提高小麦抽穗后的光合速率,同时还可以延缓叶片衰老,维持较长的光合功能期,为干物质的积累和光合产物向籽粒的转运提供了时间保障。

2.6　不同耕作方式对小麦成熟期干物质在各器官中分配的影响

表 1 结果显示,在小麦成熟期干物质在各器官中的分配量及比例均以籽粒最高,茎秆 + 叶鞘 + 叶片居中,穗轴 + 颖壳最低。免耕覆盖方式成熟期籽粒的干物质分配量和分配比例均高于常规耕作,免耕覆盖的籽粒重和总重分别比常规耕作高 57% 和 46%,差异极显著($P < 0.01$),而穗轴 + 颖壳和茎秆 + 叶鞘 + 叶片的分配比例均低于常规耕作,表明免耕覆盖有利于干物质向籽粒的分配,其营养器官干物质分配比例低。

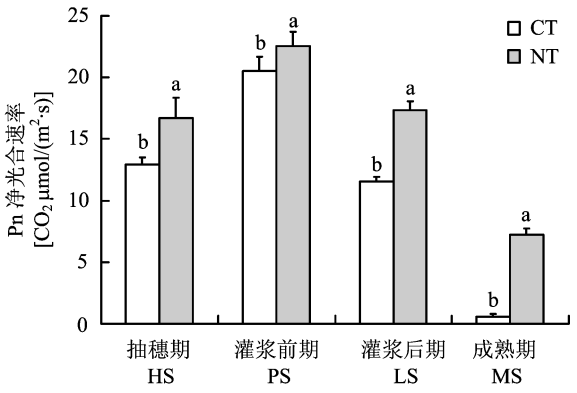

图6 不同耕作方式下冬小麦生育后期光合特性

Fig. 6 Effects of different tillage practices on photosynthetic characteristics of winter wheat

[注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch. HS—Heading stage; PS—Pre-filling stage; LS— Later filling stage; MS—Mature stage. 柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars mean significant at the 5% level.]

2.7 不同耕作方式对小麦开花前后干物质积累和转运的影响

免耕覆盖方式下小麦开花后的干物质积累量对籽粒的贡献率达64%,常规耕作为43%(表2),这表明免耕覆盖方式开花后的干物质积累量是籽粒干物质的主要来源,而常规耕作是以营养器官开花前贮藏同化物量为主。免耕覆盖方式开花后的干物质积累量和干物质同化量对籽粒产量的贡献率显著高于常规耕作;而营养器官开花前贮藏同化物的转运率和开花前贮藏同化物的转运量对籽粒产量的贡献率则低于常规处理。表明免耕覆盖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,这是免耕覆盖耕作方式获得高产的生理基础。

表1 不同耕作方式对成熟期干物质在不同器官中分配的影响

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

处理 Treatment	总重 Total (t/hm²)	籽粒 Grain		穗轴+颖壳 Spike axis + glume		茎秆+叶鞘+叶片 Stem + sheath + leaf	
		数量(t/hm²) Amount	比例(%) Ratio	数量(t/hm²) Amount	比例(%) Ratio	数量(t/hm²) Amount	比例(%) Ratio
CT	8.79 b	4.23 b	48 b	1.20 b	14 a	3.36 b	38 a
NT	12.88 a	6.64 a	52 a	1.47 a	11 b	4.77 a	37 a

注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant different between treatments at the 5% level.

表2 不同耕作方式对小麦开花前后干物质积累和转运的影响

Table 2 Effects of different tillage practices on dry matter distribution and accumulation before and after the anthesis of wheat

处理 Treatment	开花前营养器官贮藏的同化物 Dry matter accumulated in vegetative organs before anthesis			开花后的干物质积累 Dry matter accumulated after anthesis	
	向籽粒转运量 ATG (t/hm²)	转运率 TR (%)	对籽粒贡献率 CRG (%)	籽粒中积累量 AAG (t/hm²)	对籽粒贡献率 CRG (%)
CT	2.4 a	34 a	57 a	1.8 b	43 b
NT	2.4 a	28 b	36 b	4.3 a	64 a

注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch. ATG—Amount of translocation into grain; TR—Translocation ratio ; CRG—Contribution ratio to grain; AAG—Amount of accumulation into grain. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant different between treatments at the 5% level.

2.8 不同耕作方式对小麦产量的影响

从表3可以看出,免耕覆盖方式的小麦理论产量和实收产量分别比常规耕作高42%和41%,差异达极显著水平($P<0.01$)。从产量构成因素来看,免耕覆盖对小麦穗数和千粒重有显著影响,分别比常规耕作高31%和10%,而两处理间的穗粒数差异

表 3　不同耕作方式对小麦产量的影响

Table 3　Effects of different tillage practices on winter wheat yield

处理 Treatment	穗数($\times 10^4/hm^2$) Spike number	穗粒数(No./spike) Grain No. per spike	千粒重(g) 1000-grain weight	理论产量(kg/hm^2) Theoretical yield	实收产量(kg/hm^2) Actual yield
CT	330 b	24.2 a	36.7 b	2491 b	2340 b
NT	432 a	23.9 a	40.2 a	3528 a	3300 a

注(Note): CT—常规耕作 Conventional tillage; NT—免耕覆盖耕作 No-tillage with straw mulch. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant different among treatments at the 5% level.

不显著,这说明免耕覆盖对小麦前期成穗和后期灌浆影响较大,同时表明免耕覆盖方式协调了产量构成因素之间的关系,这是提高当地旱作小麦产量的关键。

3　讨论

3.1　光合特性

本研究中小麦灌浆前期旗叶净光合速率的日变化双峰曲线不明显,基本呈现单峰曲线,这与前人在小麦上的研究结果相似[17]。有研究表明,在轻度和中度干旱下植株的光合速率虽有双峰和午休现象,但是不明显;在干旱严重胁迫下,光合速率双峰消失,光合作用基本停止,表现出“一睡不起型”的光合午休[18]。

小麦灌浆前期光合日变化在上午 10:00 ~ 12:00时,净光合速率(Pn)和胞间 CO_2 浓度(Ci)降低,气孔限制值(Ls)升高。这是因为中午前后临汾地区温度特别高、蒸腾作用强烈(图 5),土壤供水不足,随着叶片水分的散失和叶水势的下降,气孔开度减小,严重干旱还将造成气孔关闭。有研究表明在植物叶片受到水分胁迫时,根系合成脱落酸,通过木质部运输到叶片,调控气孔的开闭行为[18]。

小麦灌浆前期光合日变化在下午 12:00 ~ 14:00时,在免耕覆盖方式 Ci 恒定不变和 Ls 略有降低的情况下 Pn 降低,表明非气孔因素上升,但不一定占优势(常规耕作的光合日变化与上午 10: 00 ~ 12: 00 一致)。事实上,引起叶片净光合速率降低的植物自身因素不外乎气孔的部分关闭、气孔导度下降,造成二氧化碳进入叶片受阻,另外是光合器官和光合活性下降两类,前者使 Ci 降低、Ls 升高,而后者使 Ci 增高、Ls 降低。当两种因素同时存在时,Ci 变化的方向依赖于占优势的那个因素。也就是说,当气孔的部分关闭是叶片光合速率降低的主要原因时,Ci 降低;而当叶肉细胞光合活性降低是叶片光合速率降低的主要原因时,Ci 增高。本研究免耕覆盖方式下的非气孔因素上升但不一定占优势,是因为一方面大田条件下很少发生气孔不均匀关闭[19]的情况,另一方面在水分胁迫严重的情况下不发生气孔不均匀关闭,只有在轻度和中度干旱情况下才可能发生[20]。所以在排除气孔不均匀关闭的情况下才能判断非气孔因素是否占优势。

小麦抽穗期到成熟期的净光合速率在灌浆前期达到最大。有研究表明小麦的光饱和点在 2000 μmol/(m^2 · s) 左右,所以在整个测定阶段光合辐射均未达到光饱和点;在这种情况下,小麦光合速率与光照强度成正相关关系[21-22]。因此,从抽穗期到成熟期实测小麦旗叶最大净光合速率与冠层上部光合辐射最大值时期一致(图 3)。另外,还有研究表明,在灌浆前期小麦旗叶叶绿素含量最高,后期随着叶片衰老生理活性逐渐降低[7, 23]。

3.2　免耕覆盖

免耕覆盖方式下旗叶净光合速率日变化大于常规耕作。从蒸腾速率可以看出,从上午 6:00 ~ 10:00蒸腾速率不断增大且两处理间差异较小,此时水分不是限制因素;随着时间的推进水分胁迫凸显,气孔导度降低,蒸腾速率也开始下降,但是免耕覆盖下土壤含水量大且植株生长健壮,所以表现出叶片蒸腾速率大,气孔导度比常规耕作率先降低,提前进入水分胁迫状态,但由于免耕覆盖方式下土壤水分能够持续供应,所以到午后水分胁迫相对于常规耕作要小。因此,在上午 10: 00 前无水分胁迫下免耕覆盖方式的胞间二氧化碳利用能力强,所以光合速率相对常规耕作大;在此之后由于旺盛蒸腾出现了水分胁迫现象,两处理均表现出光合速率下降,但是免耕覆盖的水分胁迫小,所以光合速率大于常规耕作。到下午 14: 00 后,随着温度和蒸腾速率的下降,水分胁迫有所缓解,并且免耕覆盖方式的气孔导度有升高趋势,所以光合速率相对常规耕作较大。

本研究表明,免耕覆盖耕作方式增强了小麦全生育期土壤的蓄水保墒能力,同时秸秆还田还提高

了土壤有机碳和土壤养分含量[24],这有利于小麦个体发育健壮及群体结构协调,进而提高小麦冠层的光能截获量,为增强小麦干物质积累和获得高产奠定了良好基础[5,25]。另外,免耕覆盖方式下小麦用于生产性耗水的蒸腾作用较强,平均瞬时水分利用效率高,并且在中午光照强、温度高的情况下,较高的土壤含水量部分缓解了因水分胁迫而出现的光合午休现象,保证了小麦光合速率处于较高水平[26]。从光合产物的积累、转运和产量来看,与常规耕作相比,免耕覆盖提高了小麦产量,这是因为免耕覆盖方式提高了小麦地上部的干物质积累总量,增强了开花后干物质的积累能力,有利于干物质向籽粒的分配,并且籽粒干物质的主要来源是开花后的干物质积累,而常规耕作则是以开花前贮藏同化物量为主要来源。因此,在大量干物质积累和高效转运的免耕覆盖方式下小麦产量与常规耕作相比差异显著[11,15]。

4 结论

经过20年的长期定位试验,免耕覆盖比常规耕作显著提高了土壤0—160 cm的储水量,起到蓄水保墒的作用,尤其是在干旱时期保水作用凸显(比常规耕作高21%)。免耕覆盖方式下小麦生长发育关键时期的光能截获量大于常规耕作(增加19.3%),并且小麦各个层次都有充分利用光能的机会,为光合作用提供了有利条件。免耕覆盖有利于水分和CO_2等通过气孔进行交换,提高叶片对胞间CO_2的利用能力,降低水分胁迫,增强小麦旗叶净光合速率和瞬时水分利用效率,并且有利于维持光合强度处在较高水平。免耕覆盖不但可以提高小麦抽穗后的光合速率,同时还可以延缓叶片衰老,维持小麦叶片较长的光合功能期,为干物质的积累和光合产物向籽粒的转运提供保障。

参考文献:

[1] 信乃诠,张燕卿,王立祥. 中国北方旱区农业研究[M]. 北京:中国农业出版社,2002. 1-3.
Xin N Q, Zhang Y Q, Wang L Y. The study on dryland agriculture in north China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002. 1-3.

[2] 王小彬,蔡典雄,华珞. 土壤保持耕作—全球农业可持续发展优先领域[J]. 中国农业科学,2006,39(4):741-749.
Wang X B, Cai D X, Hua L. Soil conservation tillage—The highest priority for global sustainable agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 741-749.

[3] 王维,韩清芳,吕丽霞,等. 不同耕作模式对旱地小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013(1):20-26.
Wang W, Han Q F, Lü L X *et al*. Effects of different tillage patterns on photosynthetic characteristics of flag leaf and yield of dryland wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013(1): 20-26.

[4] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,等. 轮耕对宁南旱区冬小麦花后旗叶光合性能及产量的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(15):3108-3117.
Hou Q X, Jia Z K, Han Q F *et al*. Effects of rotational tillage on flag leaf photosynthetic characteristics and yield after anthesis of winter wheat in arid areas of southern Ningxia[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(15): 3108-3117.

[5] 王靖,林琪,倪永君,等. 旱地保护性耕作对冬小麦光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(3):480-483.
Wang J, Lin Q, Ni Y J *et al*. Effect of conservation tillage on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat in dry land[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(3): 480-483.

[6] 吴金芝,黄明,李友军,等. 不同耕作方式对冬小麦光合作用产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):17-21.
Wu J Z, Huang M, Li Y J *et al*. Effects of different tillage systems on the photosynthesis, grain yield and WUE in winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(5): 17-21.

[7] 江晓东,王芸,侯连涛,等. 少免耕模式对冬小麦生育后期光合特性的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(5):66-69.
Jiang X D, Wang Y, Hou L T *et al*. Effects of minimum tillage and no-tillage systems on photosynthetic characteristics at late growth stages of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 66-69.

[8] 李友军,吴金芝,黄明,等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2007,22(12):44-48.
Li Y J, Wu J Z, Huang M *et al*. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 22(12): 44-48.

[9] 庞绪,何文清,严昌荣,等. 耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响[J]. 生态学报,2013,33(4):1308-1316.
Pang X, He W Q, Yan C R *et al*. Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1308-1316.

[10] 赵海波,林琪,刘义国,等. 氮磷肥配施对超高产冬小麦灌浆期光合日变化及产量的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2545-2550.
Zhao H B, Lin Q, Liu Y G *et al*. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on diurnal variation of photosynthesis at grain-filling stage and grain yield of super high-yielding wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2545-2550.

[11] 陈素英,张喜英,毛任钊,等. 播期和播量对冬小麦冠层光合有效辐射和产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2009,

17(4)：681-685.
Chen S Y, Zhang X Y, Mao R Z *et al*. Effect of sowing date and rate on canopy intercepted photo-synthetically active radiation and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(4)：681-685.

[12] 史泽艳，高晓飞，谢云. SUNSCAN 冠层分析系统在农田生态系统观测中的应用[J]. 干旱地区农业研究，2005，23(4)：78-82.
Shi Z Y, Gao X F, Xie Y. The application of SUNSCAN canopy analysis system in the measurement of field ecosystem[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4)：78-82.

[13] 段文学，于振文，石玉，等. 施氮深度对旱地小麦耗水特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报，2013，39(4)：657-664.
Duan W X, Yu Z W, Shi Y *et al*. Effects of nitrogen application depth on water consumption characteristics and dry matter accumulation and distribution in rainfed wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(4)：657-664.

[14] 郑成岩，于振文，张永丽，等. 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响[J]. 生态学报，2013，33(7)：2260-2271.
Zheng C Y, Yu Z W, Zhang Y L *et al*. Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7)：2260-2271.

[15] 朱相成，汤亮，张文宇，等. 不同品种和栽培条件下水稻冠层光合有效辐射传输特征[J]. 中国农业科学，2012，45(1)：34-43.
Zhu X C, Tang L, Zhang W Y *et al*. Transfer characteristics of canopy photo-synthetically active radiation in different rice cultivars under different cultural conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1)：34-43.

[16] 张德奇，廖允成，贾志宽，等. 旱地谷子集水保水技术的生理生态效应[J]. 作物学报，2006，32(5)：738-742.
Zhang D Q, Liao Y C, Jia Z K *et al*. Physiological and ecological effects of water collecting and conservation technique on dry-land millet[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(5)：738-742.

[17] 郑国生，王焘. 田间冬小麦叶片光合午休过程中的非气孔限制[J]. 应用生态学报，2001，12(5)：799-800.
Zheng G S, Wang T. Nonstomatic limitations in midday depression of photosynthesis in winter wheat leaves[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5)：799-800.

[18] 姚庆群，谢贵水. 干旱胁迫下光合作用的气孔与非气孔限制[J]. 热带农业科学，2006，25(4)：80-85.
Yao Q Q, Xie G S. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation under drought stress[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2006, 25(4)：80-85.

[19] Wise R R, Ortiz-Lopez A, Ort D R. Spatial distribution of photosynthesis during drought in field-grown and acclimated and nonacclimated growth chamber-grown cotton[J]. Plant Physiology, 1992, 100(1)：26-32.

[20] Ni B R, Pallardy S G. Stomatal and nonstomatal limitations to net photosynthesis in seedlings of woody angiosperms[J]. Plant Physiology, 1992, 99(4)：1502-1508.

[21] 赵风华，王秋凤，王建林，等. 小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理[J]. 生态学报，2011，31(24)：7526-7532.
Zhao F H, Wang Q F, Wang J L *et al*. Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24)：7526-7532.

[22] 康华靖，王巍伟，权伟，等. 小麦旗叶光呼吸对光强和 CO_2 浓度的响应[J]. 麦类作物学报，2013，33(6)：1208-1215.
Kang H J, Wang W W, Quan W *et al*. Response of photorespiration of wheat flag leaf to light intensities and CO_2 concentrations[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(6)：1208-1215.

[23] 路文涛，贾志宽，张鹏，等. 宁南旱区有机培肥对冬小麦光合特性和水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(5)：1066-1074.
Lu W T, Jia Z K, Zhang P *et al*. Effects of organic fertilization on winter wheat photosynthetic characteristics and water use efficiency in semi-arid areas of southern Ningxia[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5)：1066-1074.

[24] Liu E, Teclemariam S G, Yan C *et al*. Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the northern China[J]. Geoderma, 2014, 213：379-384.

[25] Su Z, Zhang J, Wu W *et al*. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3)：307-314.

[26] 姜东燕，于振文. 土壤水分对小麦产量和品质的影响[J]. 核农学报，2007，21(6)：641-645.
Jiang D Y, Yu Z W. Effects of soil water on yield and grain quality of wheat[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2007, 21(6)：641-645.