

耕作和保墒措施对冬小麦生育时期光合特征 及水分利用的影响*

杨永辉^{1,2} 武继承^{1,2} 李学军³ 潘晓莹^{1,2} 李宗军³ 何方^{1,2}

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所 郑州 450002; 2. 农业部作物高效用水原阳科学观测站 原阳 453514;
3. 河南省通许县农业科学研究所 通许 475600)

摘要 为探明不同耕作保墒措施下冬小麦生育期间光合生理特征及其增产机理,采用田间试验,以常规耕作为对照,采用深松、秸秆覆盖、免耕、施用有机肥及保水剂等措施,研究了不同耕作和保墒措施对冬小麦生育期间光合作用、产量及水分利用效率的影响。结果表明:冬小麦光合速率和叶片水分利用效率均以孕穗期最高,而灌浆期最低。蒸腾速率和气孔导度均以扬花期最高。对不同处理而言,在各生育时期均以深松处理的光合速率和叶片水分利用效率最高,其次为秸秆覆盖处理。在拔节期、孕穗期和扬花期以有机肥处理的蒸腾速率最高,而灌浆期以秸秆覆盖的蒸腾速率较高,在全生育期对照的蒸腾速率均较低。气孔导度与蒸腾速率表现规律基本一致。不同耕作、保墒措施均提高了小麦的穗数、穗粒数及千粒重,以及小麦籽粒产量和水分生产效率,降低了小麦总耗水量;各处理中以深松处理的效果最佳,其产量和水分生产效率分别较对照提高19.6%和38.3%。相关分析表明:各时期的小麦光合速率及叶片水分利用效率均与小麦产量和水分生产效率呈正相关,且随生育期的推进,其相关性增强,特别在扬花期,光合速率对于小麦产量和水分生产效率的影响更显著。

关键词 冬小麦 耕作 保墒措施 生育时期 光合作用 产量 水分利用效率

中图分类号: S344; S311 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)05-0534-09

Impact of tillage and soil moisture conservation measures on photosynthetic characteristics and water use of winter wheat

YANG Yonghui^{1,2}, WU Jicheng^{1,2}, LI Xuejun³, PAN Xiaoying^{1,2}, LI Zongjun³, HE Fang^{1,2}

(1. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China;
2. Yuanyang Experimental Station for Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China; 3. Tongxu Institute of Agricultural Sciences, Tongxu 475600, China)

Abstract Tillage and soil moisture conservation measures have been critical in crop growth, water use and yield output. These measures have improved soil structure and increased soil organic matter content, soil infiltration, and soil temperature. Moreover, tillage and soil moisture conservation measures have increased photosynthetic characteristics. However, the degree of influence of photosynthetic physiological characteristics on crop yield and water productivity efficiency at different growth stages of winter wheat under different tillage and soil moisture conservation measures has been seldom reported. To therefore ascertain the photosynthetic/physiological characteristics and mechanisms of yield increase under different tillage and soil moisture conservation measures, a field experiment was conducted to determine photosynthesis, yield and water use efficiency of winter wheat at different growth stages under the treatments of deep tillage, no-tillage, straw mulching, organic fertilization and water-retaining agent application. The results suggested that photosynthetic rate and leaf water use efficiency of winter wheat were highest at booting stage and lowest at grain-filling stage. Transpiration rate and stomatal conductance were highest at flowering stage. At all growth stages, photosynthetic rate and leaf water use efficiency were highest under deep tillage treatment, followed by straw mulch treatment. At jointing, booting and flowering stages, transpiration rate was highest under organic fertilization treatment. Then at grain filling stage, transpiration rate

* 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203077)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)和国家科技支撑计划项目(2013BAD07B07)资助

杨永辉, 主要研究方向为土壤生态与节水农业。E-mail: yangyongh@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2013-11-10 接受日期: 2014-03-12

was higher under straw mulching and no-tillage treatments than in the other treatments. Transpiration rate under control treatment was lower during all the growth stages of winter wheat compared with that under tillage and soil moisture conservation measures. The trend of change in stomatal conductance and transpiration rate was consistent. Ear length, grain number per panicle, 1000-grain weight, yield and water productivity efficiency of winter wheat increased and total water consumption reduced under different tillage and soil moisture conservation measures. This was especially obvious under deep tillage. Wheat yield and water productivity efficiency were highest under deep tillage, respectively increasing by 19.6% and 38.3% compared with the control. Correlation analysis showed that photosynthetic rate and leaf water use efficiency were positively correlated with yield and water productivity efficiency. The correlations strengthened with advancing growth process, especially so at the flowering stage. At this stage, the effect of photosynthetic rate on wheat yield and water productivity efficiency was more significant than that of leaf water use efficiency.

Keywords Winter wheat; Tillage; Soil moisture conservation measure; Growth stage; Photosynthesis; Yield; Water use efficiency

(Received Nov. 10, 2013; accepted Mar. 12, 2014)

缺水是制约我国旱地农业生产的关键因素之一, 水分胁迫是限制旱地农业生产力提高的严重问题^[1]。而保墒措施对于改善旱作农业区的土壤水分环境, 促进作物生长, 提高水分利用率及产量意义重大。

前人研究表明, 秸秆覆盖作为一种重要的保墒技术, 可以增加土壤有机质, 增强土壤蓄水能力, 改善土壤结构, 提高上层至下层土壤的含水率^[2]。同时, 地表覆盖物可以调节土壤温度, 控制水分蒸发, 减少水分损失, 提高土壤水分利用率^[3]。而少耕和免耕有利于提高土体内含水量和接纳降水的能力, 提高作物产量和水分利用效率^[4-6]。深耕可以打破犁底层, 加厚土壤耕作层, 降低土壤容重, 增加土壤孔隙度, 提高土壤的蓄水能力, 促进作物根系下扎, 增加对土壤深层水的利用量。侯贤清等^[7]研究表明, 免耕+深松+免耕和深松+免耕+深松处理较连年翻耕显著提高了 0~200 cm 土层土壤蓄水量, 且在降水较少的年份效果更佳。而施用有机肥可培肥地力, 增强土壤的蓄水、保水能力, 促进作物节水保墒, 提高作物光合速率, 增加作物产量, 提高水分利用效率^[8-10]。施用保水剂可以调节土壤水、热、气状况, 提高土壤肥力和保持水土、有效降低土壤蒸发, 改善作物生理功能^[11], 从而减少干旱胁迫对作物造成的伤害, 促进作物不同生育时期的生物量、产量和水分利用率^[12]。相关研究表明, 不同耕作与保墒措施均能对作物生理指标产生相应的影响^[13-14], 从而改善作物干旱胁迫的环境, 提高作物的光合作用, 促进作物正常生长以及作物产量和水分利用效率的提高。张云兰等^[15]研究表明, 秸秆覆盖和秸秆覆盖+腐熟剂均能提高小麦生育后期叶面积指数, 净光合速率比传统耕作分别提高 2.90%和 5.74%。王维等^[16]研究结果显示, 深松、免耕及二者轮耕能够通过提高播前底墒, 显著提高旱地小麦花后的光合能力和叶绿素荧光特性, 从而提高了小麦的产量和水分利用效率。而李友军等^[17]研究表明, 灌浆中期免耕覆

盖和深松覆盖净光合速率略低于传统耕作, 但其最终的小麦产量和水分利用效率高于传统耕作。有关不同耕作保墒措施对作物的叶片光合生理特征的影响研究虽不少见^[18-20], 但在小麦生长过程中, 其不同生育阶段光合生理特征对作物产量及水分生产效率的作用及影响程度如何, 却鲜见报道。

因此, 笔者采用秸秆覆盖、免耕、深松及施用有机肥和保水剂等耕作保墒措施, 研究了冬小麦不同生育阶段的光合生理特征与产量及水分利用的关系, 以阐明不同耕作保墒措施的作用效果及增产机理, 为不同措施的合理应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在河南省开封市通许县朱砂镇演武岗村进行。演武岗地处暖温带大陆季风气候区, 年平均日照时数 2 428 h; 年平均气温 14.2 °C, >10 °C 的有效积温 4 460 °C, 无霜期 222 d, 多年平均降水量 682.4 mm, 其中 7—9 月降水量占全年降水量的 60%, 年蒸发量为 1 936 mm, 存在较严重的春旱和伏旱。土壤为砂质潮土, 土壤母质为河流冲积物。该地区地势平坦, 海拔 60 m, 耕层有机质 11.98 g·kg⁻¹、全氮 0.85 g·kg⁻¹、全磷 0.78 g·kg⁻¹、水解氮 55.89 mg·kg⁻¹、速效磷 15.91 mg·kg⁻¹、速效钾 69.4 mg·kg⁻¹。土壤容重 1.32 g·cm⁻³, 土壤机械组成为: 砂粒(0.02~2 mm)占 82.0%, 粉粒(0.002~0.02 mm)占 8.3%, 黏粒(<0.002 mm)占 8.7%。

1.2 材料与方法

试验设置共 6 个处理, 处理 1: 对照(常规, 耕作深度为 15 cm); 处理 2: 深松(30 cm, 人工用铁铧深松); 处理 3: 秸秆覆盖(玉米秸秆粉碎 1 cm, 4 500 kg·hm⁻², 小麦出苗两周后将秸秆均匀撒于麦行之间); 处理 4: 免耕; 处理 5: 施用有机肥(鸡粪, 750 kg·hm⁻², 含氮、磷、钾量分别为 1.5%、1.2%、0.8%); 处理 6: 施用保水剂(聚丙烯酰胺类, 60 kg·hm⁻²)。除免耕处理的施肥

方式为小麦播种后点施外,其他处理的施肥方式(含有机肥处理的鸡粪)均为播种前进行撒施翻耕后播种,保水剂也为撒施后翻耕播种;除深松外,其他处理耕作方式同对照。3次重复,随机区组排列,小区面积 $4\text{ m}\times 8\text{ m}=32\text{ m}^2$ 。氮肥(尿素)施用量为纯氮 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播种前用普通过磷酸钙(P_2O_5) $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与总施氮量50%的氮肥作底肥。在拔节期和灌浆期分别追施总施氮量30%和20%的氮肥。小麦种植时间为2011年10月22日,所用小麦(*Triticum aestivum* L.)品种为‘周麦25’。试验地前茬为玉米。有机肥处理施用的氮、磷、钾无机肥用量分别减去了鸡粪原有的氮、磷、钾含量,保证每个处理的氮、磷、钾用量一致。小麦生育期间不进行任何灌水。

小麦生育期内总降水277.7 mm,比历年平均293.9 mm少64.5 mm;从播种到10月底降雨26.1 mm,11月降雨107.0 mm,12月为12.8 mm;翌年1月到6月8日小麦收获,逐月降雨量分别为3.9 mm、0.7 mm、21.5 mm、93.8 mm、11.8 mm、0.1 mm。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合作用测定

光合参数采用美国 Li-Cor 公司生产的 Li-6400 光合仪测定。在拔节期、孕穗期、扬花期和灌浆期选择晴朗无风的天气于9:30—11:00进行光合参数的测定。选择红蓝光源叶室,设定光量子密度(PAR)为 $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\mu\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,样本室内气流速率(Flow)为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$,叶室温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。测定叶片部位拔节期为小麦顶端第1片全展叶,孕穗期、扬花期和灌浆期为旗叶。分别测定净光合速率 P_n [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]、气孔导度 G_s [$\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]、蒸腾速率 Tr [$\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]、胞间 CO_2 浓度 C_i [$\text{mmol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mol}^{-1}$]。

叶片水分利用效率 WUE [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{mmol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$] 计算公式^[21-22]:

$$WUE=P_n/Tr \quad (1)$$

1.3.2 土壤水分测定

分别于小麦返青期(2月13日)、拔节期(3月31日)、孕穗期(4月20日)、灌浆期(5月18日)和收获期(6月10日)取深度为0~100 cm的土样,每20 cm为1层,采用烘干法测定土壤水分。根据不同土层的土壤容重、土层厚度和土壤含水率换算不同土层的土壤水含量(水层厚度, mm)。

$$W=(S_w-S_d)/S_d\times 100\% \quad (2)$$

$$h=H\times W\times d\times 10 \quad (3)$$

式中: W 为土壤含水率, %; S_w 为湿土质量, g; S_d 为干土质量, g; h 为土壤水含量, mm; H 为土层深度, cm; d 为土壤密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。0~100 cm 土层土壤储水量为各土层土壤水含量之和。

1.3.3 各生育期生物量计算

收获时以每小区收获 4 m^2 产量记产,将其产量折合成每公顷产量。

1.3.4 水分生产效率计算

$$\text{水分生产效率}(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2})=\text{籽粒产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})/\text{生育期耗水量}(\text{mm}) \quad (4)$$

$$\text{生育期耗水量}=\text{播种前}0\sim 100\text{ cm}\text{ 土层土壤储水量}(\text{mm})+\text{生育期内降雨量}(\text{mm})-\text{收获时}0\sim 100\text{ cm}\text{ 土层土壤储水量}(\text{mm}) \quad (5)$$

1.4 数据处理

试验光合各参数值均为9次重复(每处理3个重复内分别测定3个样品)的算术平均值,其他结果为3次重复的算术平均值,且所得的数据应用统计学及相关的数理统计软件(DPS)进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同耕作、保墒措施下不同小麦生育期0~100 cm 土壤储水量

从表1中可知,随生育期的推进,0~100 cm 土壤储水量整体表现为先降低再升高再降低的趋势。返青期,免耕处理0~100 cm 土壤储水量显著高于其他处理,其次为秸秆覆盖和保水剂处理,深松和有机肥处理居中,对照最低。拔节期,仍以免耕处理最高,对照最低,其他处理居中。孕穗期,免耕处理的储水量仍最高,其次为深松和保水剂处理,对照最低。而到灌浆期,深松处理的储水量显著高于其他处理,达160 mm,其次为免耕、有机肥、保水剂和秸秆覆盖处理,对照最低。到小麦收获期,秸秆覆盖、深松和免耕处理的土壤储水量显著高于其他处理,其次为保水剂和有机肥处理,对照仍最低,为96 mm。综上,不同耕作、保墒措施在小麦不同生育阶段均有效降低了土壤的棵间蒸发量,提高了土壤储水量。在小麦孕穗期前以免耕处理的保水能力最大,而从灌浆期开始到收获,以深松处理的抗蒸发能力最强。

2.2 不同耕作、保墒措施对小麦不同生育时期光合生理特征的影响

2.2.1 对光合速率的影响

从表2中可知,小麦叶片的光合速率表现为孕穗期>拔节期>扬花期>灌浆期。拔节期,深松处理的光合速率显著高于其他处理,对照最低,但与其他处理的光合速率差异不显著。孕穗期,各处理中有有机肥和深松处理的光合速率显著高于其他处理,其次为秸秆覆盖和免耕处理,对照最低。而到扬花期,仍以深松处理最高,其次为秸秆覆盖和免耕处理,有机肥和保水剂处理次之,对照最低。到灌浆期,对

表 1 不同耕作、保墒措施处理下小麦不同生育时期 0~100 cm 土壤储水量

Table 1 0–100 cm soil water storage under different tillage and soil moisture conservation measures at different wheat growth stages mm

处理 Treatment	返青期 Greening	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	灌浆期 Grain filling	收获期 Harvest
对照 CK (conventional tillage)	135.3±5.8d	136.6±9.5c	135.0±4.7e	100.2±6.4e	96.0±5.3d
深松 Deep tillage	155.9±6.7c	146.8±6.7b	165.0±4.2b	160.0±5.3a	140.9±6.8a
秸秆覆盖 Straw mulching	162.0±4.9b	147.2±7.6b	150.1±6.3c	121.1±7.8d	142.6±6.7a
免耕 No-tillage	174.9±6.1a	164.7±8.1a	177.3±5.2a	150.5±10.1b	138.5±7.4a
有机肥 Organic manure	154.9±10.2c	148.3±8.3b	143.5±4.6d	145.9±9.2c	121.9±6.4c
保水剂 Water-retention agent	160.2±8.3b	145.6±6.5b	165.7±5.1b	124.9±7.9d	128.8±7.7b

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$), 下同。Different small letters in the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level (LSD test). The same below.

表 2 不同耕作、保墒措施对小麦各生育时期光合生理特征的影响

Table 2 Photosynthetic physiological characteristics of wheat at different growth stages under different tillage and soil moisture conservation measures

处理 Treatment	光合速率 Photosynthetic rate [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]				蒸腾速率 Transpiration rate [$\text{mmol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	扬花期 Flowering	灌浆期 Grain filling	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	扬花期 Flowering	灌浆期 Grain filling
对照 CK (conventional tillage)	11.60±1.39b	13.48±1.22d	8.01±0.87e	2.06±0.22c	3.36±0.29d	2.82±0.11d	6.26±0.42c	2.81±0.08e
深松 Deep tillage	14.04±1.11a	15.03±1.20a	9.67±0.99a	4.97±0.11a	3.55±0.35c	2.88±0.11d	6.32±0.51c	3.52±0.20d
秸秆覆盖 Straw mulching	12.28±1.16b	14.63±1.31b	9.28±0.84b	4.38±0.14b	3.21±0.21e	2.98±0.09c	6.32±0.42c	4.75±0.31a
免耕 No-tillage	12.04±1.23b	14.77±1.44b	9.21±1.02b	4.96±0.09a	3.67±0.12b	3.15±0.13b	6.44±0.33b	4.37±0.35c
有机肥 Organic fertilizer	12.10±1.50b	15.09±2.01a	8.53±1.13c	4.44±0.21b	3.75±0.15a	3.25±0.24a	6.57±0.35a	4.59±0.22b
保水剂 Water-retention agent	12.10±0.97b	14.11±1.65c	8.17±1.32d	4.38±0.34b	3.56±0.22c	3.04±0.04c	6.28±0.44c	4.64±0.28b

处理 Treatment	气孔导度 Stomatal conductance [$\text{mol}(\text{H}_2\text{O})\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]				胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration [$\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$]			
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	扬花期 Flowering	灌浆期 Grain filling	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	扬花期 Flowering	灌浆期 Grain filling
对照 CK (conventional tillage)	0.393±0.012d	0.471±0.010e	1.875±0.101e	0.331±0.021e	303.0±20.1a	283.1±25.6ab	319.5±22.4a	352.5±23.2a
深松 Deep tillage	0.455±0.010b	0.498±0.014d	2.108±0.212d	0.471±0.016d	297.9±31.3a	279.3±33.1b	317.5±27.6a	343.0±32.5b
秸秆覆盖 Straw mulching	0.350±0.005e	0.517±0.017c	2.095±0.303d	0.620±0.032c	290.7±23.4b	284.1±24.5ab	321.5±25.3a	340.3±25.2b
免耕 No-tillage	0.435±0.009c	0.541±0.006b	2.880±0.210a	0.738±0.011a	304.2±45.2a	287.7±40.8a	322.5±24.2a	343.0±32.6b
有机肥 Organic fertilizer	0.478±0.008a	0.560±0.015a	2.122±0.235c	0.618±0.015c	305.2±33.6a	287.3±32.3a	320.5±23.6a	341.0±23.5b
保水剂 Water-retention agent	0.428±0.013c	0.515±0.012c	2.163±0.086b	0.632±0.022b	303.0±22.0a	288.4±23.5a	323.5±26.8a	338.5±30.3c

照仍最低, 而免耕和深松处理显著高于其他处理, 有机肥、秸秆覆盖和保水剂处理次之。综上, 耕作、保墒措施有利于提高小麦的光合速率, 且不同生育阶段均以深松处理的效果最佳, 而免耕处理在小麦生育后期效果更为明显。

2.2.2 对蒸腾速率的影响

从表 2 可知, 各生育期小麦叶片的蒸腾速率表现为扬花期>灌浆期>拔节期>孕穗期。在拔节期, 以有机肥处理的蒸腾速率最高, 其次为免耕、保水剂、深松和对照处理, 秸秆覆盖处理最低。到孕穗期和扬花期, 仍以有机肥处理最高, 其次为免耕处理, 秸秆覆盖、保水剂和深松处理居中, 对照最低。到灌浆期, 以秸秆覆盖处理最高, 其次为保水剂、有机肥、免耕和深松处理, 对照最低。综上, 在小麦扬花期前, 有机肥处理的蒸腾速率均最高, 而到灌浆期, 以免耕处理的蒸腾速率较高, 且除拔节期秸秆覆盖处理外, 对照的蒸腾速率在不同生育期均最低。

2.2.3 对气孔导度的影响

从表 2 可知, 各生育时期小麦叶片气孔导度表现为扬花期>灌浆期>孕穗期>拔节期。拔节期以有机肥处理的气孔导度最大, 其次为深松、免耕、保水剂、对照处理, 秸秆覆盖处理最小。孕穗期仍以有机肥处理的气孔导度最大, 其次为免耕、秸秆覆盖、保水剂和深松, 对照气孔导度最小。扬花期各处理的气孔导度均显著增大, 其中, 以免耕处理最大, 对照最小, 其他处理居中。灌浆期仍以免耕处理最大, 其次为保水剂、秸秆覆盖、有机肥和深松, 对照最低。综上, 在小麦不同生育时期, 不同耕作保墒措施对小麦叶片气孔导度的影响程度不同。在小麦扬花期前, 有机肥处理对于叶片气孔导度的提高作用最为显著, 而到小麦扬花期后, 免耕处理促进了气孔导度的提高。

2.2.4 对胞间 CO_2 浓度的影响

从表 2 可知, 不同生育时期的胞间 CO_2 浓度表

现为灌浆期>扬花期>拔节期>孕穗期。在拔节期,除秸秆覆盖处理的胞间 CO₂ 浓度最低外,其他处理间差异不显著。孕穗期以深松处理的胞间 CO₂ 浓度最低,其他处理间差异均不显著。扬花期仍以深松处理最低,但其与各处理间差异均不显著。灌浆期以对照的胞间 CO₂ 浓度最高,保水剂处理最低,其他处理居中。说明不同耕作保墒处理对胞间 CO₂ 浓度的影响较小。

2.3 不同耕作、保墒措施对小麦不同生育时期叶片水分利用效率的影响

从表 3 可知,各生育时期小麦叶片水分利用效

率表现为:孕穗期>拔节期>扬花期>灌浆期。拔节期和孕穗期以深松处理的水分利用效率最高,其次为秸秆覆盖处理,其他处理均低于对照,且以有机肥处理的叶片水分利用效率最低。扬花期仍以深松处理最高,其次为秸秆覆盖和免耕处理,有机肥、保水剂和对照处理最低。灌浆期仍以深松处理的水分利用效率最高,其次为免耕、保水剂、有机肥和秸秆覆盖处理,对照仍最低。综上,深松处理在小麦各生育时期的水分利用效率均最高,其次为秸秆覆盖处理(灌浆期除外)。说明深松有利于提高小麦的叶片水分利用效率,从而促进水分利用潜力的提高。

表 3 不同耕作、保墒措施处理下小麦不同生育时期水分利用效率

Table 3 Water use efficiency of wheat at different growth stages under different tillage and soil moisture conservation measures [$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{mmol}^{-1}(\text{H}_2\text{O})$]

处理 Treatment	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	扬花期 Flowering	灌浆期 Grain filling
对照 CK (conventional tillage)	3.45±0.09c	4.78±0.33c	1.28±0.11c	0.73±0.01e
深松 Deep tillage	3.95±0.13a	5.22±0.41a	1.53±0.12a	1.41±0.10a
秸秆覆盖 Straw mulching	3.83±0.12b	4.91±0.35b	1.47±0.09b	0.92±0.03d
免耕 No-tillage	3.28±0.32d	4.69±0.32d	1.43±0.23b	1.14±0.07b
有机肥 Organic fertilizer	3.23±0.10d	4.64±0.44d	1.30±0.08c	0.97±0.03c
保水剂 Water-retention agent	3.40±0.23c	4.65±0.09d	1.30±0.10c	0.94±0.02c

2.4 不同耕作、保墒措施对作物产量及水分生产效率的影响

由表 4 可知,不同耕作、保墒处理均提高了小麦成穗数、穗粒数和千粒重。各处理中,以深松和秸秆覆盖处理的穗数较对照增加最为显著,对照穗数最低。小麦穗粒数以深松处理最高,其次为免耕和有机肥处理,秸秆覆盖和保水剂处理居中,对照最低。而千粒重以深松和保水剂处理较高,其次为秸秆覆盖、免耕和有机肥,对照最低。同时,不同耕作、保墒措施降

低了小麦全生育期的耗水量,提高了小麦产量和水分生产效率。各处理中,以对照耗水量最大,其次为保水剂和有机肥处理,深松、秸秆覆盖和免耕处理较低。而小麦产量表现为:深松>免耕>秸秆覆盖>有机肥>保水剂>对照。水分生产效率以深松、秸秆覆盖及免耕处理较高,分别较对照提高 38.3%、34.2%和 32.9%。

综上,不同耕作保墒措施下小麦产量构成因素得到改善,产量和水分生产效率得到提高,且以深松效果最佳。

表 4 不同耕作、保墒措施处理下小麦产量、产量构成因素及水分生产效率

Table 4 Yield, yield components and water production efficiency of wheat under different tillage and soil moisture conservation measures

处理 Treatment	穗数 Number of panicle (m ⁻²)	穗粒数 Grains number per panicle	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	总耗水 Water consumption (mm)	水分生产效率 Water production efficiency (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
对照 CK (conventional tillage)	472±25d	29.4±1.1d	34.2±1.8c	4 319.5±102.3f	334.2±20.3a	12.92±0.89c
深松 Deep tillage	523±32a	36.3±2.3a	37.3±1.2a	5 168.1±114.6a	289.3±16.9d	17.87±1.03a
秸秆覆盖 Straw mulching	514±36a	34.1±2.4c	36.6±2.1ab	4 986.1±120.4c	287.6±19.2d	17.34±1.32a
免耕 No-tillage	499±28b	35.6±1.7b	36.3±2.3b	5 006.9±111.1b	291.7±18.6d	17.17±1.46a
有机肥 Organic fertilizer	488±30c	35.3±3.0b	36.2±3.0b	4 770.8±98.5d	301.4±22.5c	15.83±1.25b
保水剂 Water-retention agent	492±22bc	34.1±1.6c	37.1±2.7a	4 691.7±89.6e	308.3±19.8b	15.22±2.01b

2.5 小麦不同生育时期土壤储水量与光合速率和产量的相关性

对不同生育时期土壤储水量与光合速率、叶片水分利用效率、小麦产量及水分生产效率进行相关性分析如表 5。可以看出,不同生育时期的土壤储水

量与光合速率等呈正相关关系,随生育期的推进,其相关性不断增强,尤其是到灌浆期,相关性达显著水平。说明随着小麦生育期的推进,根系生长深度增加,0~100 cm 土壤储水量对小麦光合作用及产量和水分生产效率的提高作用更为显著。

表 5 小麦不同生育时期土壤水分与光合速率、产量、水分利用效率和水分生产效率的相关性分析

Table 5 Relationship of soil moisture with photosynthetic rate, yield, water use efficiency and water production efficiency of wheat at different growth stages

项目 Item	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Grain filling stage
光合速率 Photosynthetic rate	0.260 8	0.342 6	0.930 8*
叶片水分利用效率 Water use efficiency	0.205 9	0.151 0	0.865 1*
产量 Yield	0.388 8	0.448 9	0.672 7*
水分生产效率 Water production efficiency	0.403 6	0.409 6	0.614 7*

“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著相关, 下同。“*” and “**” indicate significant relationship at $P < 0.05$, $P < 0.01$, respectively. The same below.

2.6 小麦不同生育时期叶片光合速率、水分利用效率与产量及水分生产效率的相关性

光合速率及叶片水分利用效率与产量及水分生产效率相关性分析如表 6。可以看出, 小麦不同生育时期的光合速率及叶片水分利用效率均与小麦产量和水分生产效率呈正相关, 但不同时期的相关程度存在一定差异。随生育期的推进, 相关性增强, 且在

扬花期相关性更强, 达到显著或极显著水平, 且光合速率较叶片水分效率对于小麦产量和水分生产效率的影响更为显著。说明可以通过采用合理的措施改善小麦不同生育期的光合速率来实现小麦产量和水分生产效率的提高, 特别是在扬花期。但有报道表明, 作物光合速率与产量之间无明显相关性^[23], 而因作物品种而异^[24-25]。

表 6 小麦不同生育时期叶片光合速率及叶片水分利用效率与小麦产量及水分生产效率的相关性

Table 6 Relationships of photosynthetic rate and leaf water use efficiency with yield and water production efficiency of wheat at different growth stages

项目 Item	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	扬花期 Flowering stage	灌浆期 Grain filling stage	
产量 Yield	光合速率 Photosynthetic rate	0.533 3	0.717 3*	0.883 2**	0.819 2*
	叶片水分利用效率 Water use efficiency	0.243 8	0.290 9	0.783 3*	0.734 7*
水分生产效率 Water production efficiency	光合速率 Photosynthetic rate	0.450 8	0.725 9*	0.866 8**	0.819 3*
	叶片水分利用效率 Water use efficiency	0.226 7	0.243 0	0.758 3*	0.640 0

3 讨论与结论

1) 小麦产量的 90%~95% 源于光合作用^[26]。叶片的光合速率是各种生理和水肥条件的综合反映, 其结果可作为分析作物产量限制因素的重要依据^[27]。作物不同生育阶段对光能利用率的大小会对作物最终的产量产生重要影响, 而作物光合生理特征因外界环境条件的不同而存在一定的差异。本研究发现, 随小麦生育进程的推进, 其光合速率以孕穗期最高, 其次为拔节期和扬花期, 灌浆期最低, 这与以往的研究结果一致^[11]。而蒸腾速率以扬花期最高, 其次为灌浆期和拔节期, 孕穗期最低, 这可能是扬花期的气孔导度较高而导致过多的水汽从叶片中逸散所致。叶片的水分利用效率以孕穗期最高, 其次为拔节期和扬花期, 而灌浆期最低。这是因为孕穗期光合速率较大而相对蒸腾速率较小, 从而导致该时期的叶片水分利用效率较高, 这可能与该时期的小麦生理特点^[28]及气孔导度有关。

2) 光合速率越高, 转化的有机物质越多, 越有利于作物产量的提高。而气孔作为植物叶片 H_2O 和 CO_2 进出的门户, 控制着植物的光合作用和蒸腾作

用。随气孔导度的增加, 作物光合速率和蒸腾速率也相应提高, 但光合速率提高的幅度较蒸腾速率大, 因此, 其叶片水分利用效率相应提高^[29], 但因小麦品种的不同, 结果并不一致^[30]。而作物水分利用效率的提高是通过提高光合速率及降低作物的无效蒸腾与土面的无效蒸发^[31-32]来实现的。

作物的光合速率不仅与环境因子有关, 还受土壤水分状况的影响^[33]。已有研究表明^[34-35], 随着土壤含水量的下降, 叶片的净光合速率和蒸腾速率也明显下降。而采用适宜的耕作保墒措施, 可有效改善土壤水分环境, 增强作物的光合生理特性^[18], 从而可提高水分利用的潜力。本研究结果表明, 在小麦不同生育阶段不同耕作保墒措施均有效地提高了土壤储水量, 各处理中以免耕和深松处理效果较佳。同时, 在不同生育时期, 深松处理的光合速率和叶片水分利用效率均最高, 其次为秸秆覆盖, 这是因为深松打破了犁底层, 促进了水分入渗与保存; 而秸秆覆盖在减少了太阳辐射而降低了土面水分蒸发的同时, 提高了土壤有机质含量, 改善了土壤结构, 从而促进了水分的入渗和保存, 且有助于叶绿素的合成^[17,19], 进而改善了小麦的光合特征, 促进

了水分利用。但在拔节期和孕穗期,除深松和秸秆覆盖处理外,其他处理的叶片水分利用效率均低于对照,而在孕穗期以后,不同措施的叶片水分利用效率均显著高于对照。说明深松和秸秆覆盖处理能够改善小麦全生育期的叶片水分利用效率,而保水剂、免耕和有机肥处理在小麦生育中后期更能发挥其作用而促进小麦水分利用能力的提高,各处理中以深松处理效果最佳,这与付国占等^[20]研究结果一致。

4)保护性耕作因能改善土壤水分状况,增强小麦的光合性能,从而有利于光合产物的积累,形成较高的籽粒产量与生物产量。侯贤清等^[36]研究表明,不同轮作方式显著改善了小麦花后期的水分状况,增强了花后旗叶的光合特性,最终提高了穗粒数、千粒重及小麦产量。吴金芝等^[19]和韩宾等^[37]的研究结果与其一致。本研究结果表明:土壤水分与光合速率及叶片水分利用效率,以及光合速率和叶片水分利用效率与小麦产量和水分生产效率呈一定的正相关关系,且随小麦生育时期的推进相关性增强。而不同耕作保墒措施通过改善土壤水分,调整作物光合特征,促进干物质积累,从而有利于作物产量和水分生产效率的提高。各处理中以深松处理的效果最佳,其较对照增产 19.6%,水分生产效率较对照提高 38.3%。

5)本研究为 1 年的结果,但其在一定程度上能够反映不同措施对小麦光合特性的影响规律。而对于不同耕作、保墒措施对小麦光合特性影响的年际间差异及影响程度有待于进一步研究。同时,本研究中水分生产效率的土壤水分计算土层深度仅为 0~100 cm,可能会与其他相关研究的数据有所差异。

参考文献

- [1] 李生秀, 胡田田, 高亚军. 旱地土壤的合理施肥[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 11(S1): 1-6
Li S X, Hu T T, Gao Y J. Rational fertilization in dry land soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1993, 11(S1): 1-6
- [2] 张树兰, Lovdahl L, 同延安. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 28-32
Zhang S L, Lovdahl L, Tong Y A. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(4): 28-32
- [3] 于舜章, 陈雨海, 周勋波, 等. 冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 175-178
Yu S Z, Chen Y H, Zhou X B, et al. Effect of straw-mulch during wheat stage on soil water dynamic changes and yield of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 175-178
- [4] 姚宇卿, 吕军杰, 王育红, 等. 保护耕作对豫西旱地冬小麦产量及效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 42-44
Yao Y Q, Lü J J, Wang Y H, et al. Effect of conservation tillage on yield and benefit of winter wheat in dry-land in the west Henan[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 42-44
- [5] 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 20-24
Jiang X D, Li Z J, Hou L T, et al. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil NO₃-N content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(7): 20-24
- [6] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 44-51
Mao H L, Li J, Jia Z K, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 44-51
- [7] 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85-94
Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 85-94
- [8] Bolan N S, Adriano D C. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(1): 120-128
- [9] 杨志臣, 吕贻忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214-218
Yang Z C, Lü Y Z, Zhang F R, et al. Comparative analysis of the effects of straw-returning and decomposed manure on paddy soil fertility betterment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 214-218
- [10] 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
- [11] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 保水剂对冬小麦土壤水分和光合生理特征的影响[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(5): 36-41
Yang Y H, Wu P T, Wu J C, et al. Effects of water retaining agent on soil moisture, photosynthesis characteristics of *Triticum aestivum* L.[J]. Science of Soil and Water Conserva-

- tion, 2010, 8(5): 36-41
- [12] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 冬小麦不同生育阶段水分利用对保水剂与氮肥的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 888-894
Yang Y H, Wu J C, Wu P T, et al. Response of water use of winter wheat at different growth stages to nitrogen fertilizer and water-retaining agent[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 888-894
- [13] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同土壤水分条件下冬小麦根系分布规律及其耗水特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(8): 18-21
Xiao J F, Liu Z D, Duan A W, et al. Root distribution and water consumption characteristics of winter wheat under different soil moisture[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(8): 18-21
- [14] 郑世宗, 卢成, 柯惠英. 不同水肥模式单季水稻生长特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(10): 34-37
Zheng S Z, Lu C, Ke H Y. The growth characteristics of single-cropping rice in different combinations of irrigation and fertilization[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(10): 34-37
- [15] 张云兰, 王龙昌, 邹聪明, 等. 保护性耕作对小麦生长和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 71-74
Zhang Y L, Wang L C, Zou C M, et al. Effects of conservation tillage on growth and WUE in wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 71-74
- [16] 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, 31(1): 20-26
Wang W, Han Q F, Lü L X, et al. Effects of different tillage patterns on photosynthetic characteristics and yield of dryland wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 20-26
- [17] 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, 2006, 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, 2006, 22(12): 44-48
- [18] 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
- [19] 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 functions, grain yield and WUE in winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(5): 17-21
- [20] 付国占, 李潮海, 王俊忠, 等. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 52-56
Fu G Z, Li C H, Wang J Z, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(1): 52-56
- [21] Fischer R A, Turner N C. Plant production in the arid and semiarid zones[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29: 277-317
- [22] Powel S B. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1984, 35: 15-44
- [23] 苗以农. 大豆光合作用与产量研究的概述[J]. 大豆通报, 1999(1): 25-26
Miao Y N. Overview of photosynthesis and yield of soybean[J]. Soybean Bulletin, 1999(1): 25-26
- [24] 孙守钧, 马鸿图. 高粱光合作用与产量关系的饰变[J]. 华北农学报, 2000, 15(3): 45-50
Sun S J, Ma H T. Alteration on the relationship between photosynthesis and yield of sorghum[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2000, 15(3): 45-50
- [25] 朱保葛, 柏惠侠, 张艳, 等. 大豆叶片净光合速率、转化酶活性与籽粒产量的关系[J]. 大豆科学, 2000, 19(4): 346-350
Zhu B G, Bai H X, Zhang Y, et al. Relationships between net photosynthetic rate invertase activity of leaf and seed weight per plant of soybean strains (variety)[J]. Soybean Science, 2000, 19(4): 346-350
- [26] 胡廷积, 杨永光, 马元喜, 等. 小麦生态与生产技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1986: 19-23
Hu T J, Yang Y G, Ma Y X, et al. Wheat Ecological Production Technology[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1986: 19-23
- [27] 上官周平, 李世清. 旱地作物氮素营养生理生态[M]. 北京: 科学出版社, 2004
Shangguan Z P, Li S Q. Physical Ecology of Nitrogen Nutrition of Dry Crop[M]. Beijing: Science Press, 2004
- [28] 杨永辉, 武继承, 何方, 等. 保水剂用量对冬小麦光合特性及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 131-135
Yang Y H, Wu J C, He F, et al. Effect of dosage of water-retaining agent on photosynthetic characteristics and water utilization in different growth stages of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 131-135
- [29] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 116-123
Yang Y H, Wu P T, Wu J C, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 116-123
- [30] 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 保水剂对小麦生长及生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 133-137
Yang Y H, Wu J C, Wu P T, et al. Effects of water-retaining agent on growth and physiological characteristics of wheat[J].

- Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(3): 133–137
- [31] 杨永辉, 赵世伟, 黄占斌, 等. 沃特多功能保水剂保水性能研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 35–37
Yang Y H, Zhao S W, Huang Z B, et al. Study on water conserving ability of multifunctional water absorbant[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(5): 35–37
- [32] 杨永辉, 武继承, 赵世伟, 等. PAM 的土壤保水性能研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 120–124
Yang Y H, Wu J C, Zhao S W, et al. Effects of PAM on soil retention water[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2007, 35(12): 120–124
- [33] 杜菁昀, 杜占池, 崔骁勇. 内蒙古典型草原地区常见植物光合、蒸腾速率和水分利用效率的比较研究[J]. 草业科学, 2003, 20(6): 11–15
Du J Y, Du Z C, Cui X Y. A comparative study on photosynthesis, transpiration rate and water use efficiency of common plants in typical steppe grassland of Inner Mongolia[J]. Pratacultural Science, 2003, 20(6): 11–15
- [34] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 777–783
Gao F, Jia Z K, Lu W T, et al. Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of Southern Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 777–783
- [35] 侯贤清, 韩清芳, 贾志宽, 等. 宁南旱区坡地等高条带轮种对谷子产量及光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 52–58
Hou X Q, Han Q F, Jia Z K, et al. Effect of strip planting millet of yield and photosynthetic characteristics in sloping farmland in southern semi-arid area of Ningxia[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 52–58
- [36] 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 X Q, 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
- [37] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 48–53
Han B, Li Z J, Wang Y, et al. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 48–53