

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171115

郭瑶, 陈桂平, 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 柴强. 内陆灌区小麦秸秆还田对玉米光能利用及水分生产效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 847-855

GUO Y, CHEN G P, YIN W, FENG F X, ZHAO C, YU A Z, CHAI Q. Effect of wheat straw retention on light energy utilization and water production benefits of maize in inland irrigated region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 847-855

内陆灌区小麦秸秆还田对玉米光能利用及水分生产效益的影响*

郭瑶^{1†}, 陈桂平^{1†}, 殷文¹, 冯福学², 赵财¹, 于爱忠¹, 柴强^{1**}

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学水利水电工程学院 兰州 730070)

摘要: 研究前茬作物秸秆处理方式对后茬作物光能利用及水分生产效益的影响, 对于建立高效种植制度、优化栽培措施, 建立干旱内陆灌区作物生产的节本增效技术具有重要指导意义。2009—2012年, 在干旱内陆灌区, 通过田间定位试验, 研究了小麦不同秸秆还田方式(NTSS: 25~30 cm 高茬收割立茬免耕; NTS: 25~30 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕; TIS: 25~30 cm 高茬等量秸秆翻耕; CT: 传统无留茬翻耕)对后茬作物玉米光能利用及水分生产效益的影响, 以期优化试区玉米种植模式提供依据。结果表明, 与CT相比, 小麦秸秆还田降低了玉米大喇叭口期之前的叶日积(LAI-D), 但增大了吐丝期之后的LAI-D, 延缓了衰老; NTSS、NTS、TIS比CT处理玉米全生育期总LAI-D分别提高11.2%~14.5%、16.3%~20.8%、6.0%~7.5%, 以NTS提高LAI-D幅度较大。秸秆还田有利于提高玉米籽粒产量, 以NTS增产效应更高, 较CT增幅为13.7%~17.5%。秸秆还田提高了玉米全生育期光能利用率, 以NTS提高作用最明显, 提高比例为5.3%~11.8%。NTSS、NTS可降低生产成本, 提高纯收益与产投比, 以NTS最为突出, 比CT纯收益增加22.2%~35.5%(高3 953~5 200元·hm⁻²)、产投比增大16.8%~23.4%, 水分生产力与单方水效益分别提高13.7%~17.5%与25.6%~33.1%。因此, 小麦秸秆免耕覆盖(NTS)可作为河西绿洲灌区发展节本增效玉米生产关键技术。

关键词: 秸秆还田; 免耕; 光能利用; 经济效益; 作物生产力

中图分类号: S341.1; S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)06-0847-09

Effect of wheat straw retention on light energy utilization and water production benefits of maize in inland irrigated region*

GUO Yao^{1†}, CHEN Guiping^{1†}, YIN Wen¹, FENG Fuxue², ZHAO Cai¹, YU Aizhong¹, CHAI Qiang^{1**}

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

* 国家自然科学基金项目(31771738)、国家公益性行业(农业)科研项目(201503125-3)和国家科技支撑计划项目(2015BAD22B04)资助

** 通信作者: 柴强, 主要从事多熟种植、循环农业、保护性耕作技术与理论研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

† 同等贡献者: 郭瑶, 主要从事保护性耕作、节水农业研究, E-mail: guoyaogsau@126.com; 陈桂平, 主要从事多熟种植研究, E-mail: chengp@gsau.edu.cn

收稿日期: 2017-11-30 接受日期: 2018-01-20

* This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (31771738), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503125-3), and the National Key Technology R&D Program of China (2015BAD22B04).

** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

† Equal contributors

Received Nov. 30, 2017; accepted Jan. 20, 2018

Abstract: The response of light energy utilization and production benefit of crops to straw return to soils usually is important for establishing highly efficient cropping systems and optimizing cultivation practices. It is also the theoretical basis for exploring the cost-saving and benefits-increasing crop production in arid inland irrigation area. A field experiment was carried out in a typically irrigated oasis region in 2009–2012 in the Hexi Corridor of China to determine the effects on light energy utilization and production benefit of maize of different treatments of wheat straw return to soil and different tillage operations. The tillage and wheat straw retention operations included (i) no tillage with straw standing (NTSS), in which no tillage was combined with 25 to 30 cm high wheat straw standing in the field after wheat harvesting in the previous fall; (ii) no tillage with straw covering (NTS), in which no tillage was combined with 25 to 30 cm long wheat straw evenly spread on the soil surface at wheat harvest in the previous fall; (iii) tillage with straw incorporation (TIS), in which 25 to 30 cm long wheat straw was incorporated into the soil through conventional deep tillage (30 cm) at wheat harvest in the previous fall; and (iv) conventional deep tillage without wheat straw retention (as control), in which conventional deep (30 cm) plow was done with wheat straw removed from the field. The results showed that compared with the control, wheat straw retention treatments reduced leaf area duration (LAI-D) of maize before the large bell mouth stage, however, increased LAI-D of maize after silking, which effectively delayed senescence. No tillage with straw standing and straw covering (NTSS and NTS) had the best effects on senescence delay among all treatments, and the total LAI-D increased by 11.2% to 14.5% under NTSS, 16.3% to 20.8% under NTS and 6.0% to 7.5% under TIS, respectively; specifically, the increase in LAI-D under NTS treatment was the highest. Wheat straw retention had the effect of improving light use efficiency of maize field, and NTS treatment had the highest increasing effect, whose light use efficiency was 5.3% to 11.8% higher than that of the control. The previous wheat straw retention was favorable to increase grain yield of maize, and NTS treatment had the best increasing effect of grain yield, boosted grain yield by 13.7% to 17.5% compared with the control. NTSS and NTS treatments reduced the production cost, while improved the net return and the input-output ratio. NTS treatment had the large increasing range, increased the net return and the input-output ratio by 22.2% to 35.5% (3 953 to 5 200 ¥·hm⁻²) and 16.8% to 23.4%, respectively. Meanwhile, the water productivity and benefit per cubic meter water were improved by 13.7% to 17.5% and 25.6% to 33.1%, respectively. Based on the results therefore, no tillage with 25 cm to 30 cm long wheat straw covering over soil surface (NTS) was the most suitable straw return strategy, which can be used as the key technology for cost-saving and benefits-increasing maize production in arid inland irrigation area.

Keywords: Straw retention; No tillage; Light energy utilization; Economic benefits; Crop productivity

河西绿洲灌区光热水土条件利于玉米(*Zea mays*)生产,但玉米长期连作种植,产量、品质下降,经济效益降低,制约其发展^[1]。通过运用后作倒茬平衡土壤养分,以及稳产、高产优势^[2],促进玉米产业可持续发展亟待研究。另外,土壤水分作为作物生产的约束性条件,受到土壤耕作措施、种植模式、栽培方式等因素的影响^[3],而土壤水分的变化与作物生产密切相关^[4]。河西绿洲灌区资源型缺水及水分利用效率低等问题十分突出^[5],因此,通过优化耕作措施及种植模式提高有限供水条件下灌溉水的生产效率是未来农业发展的重点方向。众所周知,提高农田纯收益是生产者共同目标,如何降低生产成本提高收益是研究者解决的重要问题。作物生产中,运用少耕秸秆还田等保护性耕作技术可以通过减少机械作业量,增加土壤含水量,改善土壤理化性状,创造有利于作物生长及提高作物产量的土壤环境,通过降低成本而增加农民收入^[6-7];另一方面,有效减少水土流失,防止风蚀水蚀,提高生态环境可持续性^[8-9]。因此,通过优化秸秆还田技术提高水分生产效益与纯收益的双赢效应是实现玉米产业可持续发展的重要措施。

光能是农业生产系统初级生产的主要驱动力,也是作物转化利用的对象,太阳辐射能利用率的理论值

为 5%~6%^[10],光合有效辐射(PAR)的利用率可达 10%~12%^[11],远远高于农作物生育期间光能利用率,提高作物产量的限制因素不是光能不足,而是光能利用率低^[12-13]。因此,通过优化耕作措施提高农田光能利用率研究非常迫切。目前,有关农作物光能利用和生产效益的研究主要集中在优化灌溉制度^[14]、施肥制度^[15]、种植密度^[16]、种植模式^[17]、种植方式^[18]等因素,并证实适宜的灌水施肥量配套合理的种植密度及模式可提高农田光能利用及水分生产效益。关于如何将上述因素整合成为优化栽培模式及其对生产效益和光能利用的调控效应尚不清楚。为此,本研究在典型干旱绿洲灌区,以小麦(*Triticum aestivum*)后作玉米为研究对象,将小麦秸秆还田方式与地膜覆盖组装集成在玉米栽培模式中,重点探讨了前茬小麦秸秆还田及耕作方式对后茬玉米的水分生产效益与光能利用率的影响,以期为区域内发展高产玉米栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究于 2009—2012 年度在甘肃农业大学绿洲农业综合试验站进行田间试验。试验区位于甘肃河西走廊东端,属寒温带干旱气候区,年平均气温

7.2 °C, ≥ 10 °C 的积温 2 985.4 °C; 日照时数 2 945 h, 适宜长生育期高产作物栽培。试区多年平均降雨量约为 150 mm, 主要集中在 7—9 月, 每年潜在蒸发量高于 2 000 mm, 是典型的绿洲灌溉农业区。2011 年和 2012 年, 玉米生育期内降水量分别为 94.7 mm 与 128.5 mm。该区玉米种植比例大于 30%, 连作普遍, 耕作以传统深翻耕为主, 均采用地膜覆盖种植, 属于典型的高投入生产模式。

1.2 试验设计

2009 年布置预备试验, 建立不同小麦秸秆还田方式。2010 年与 2012 年度重复前茬不同小麦秸秆还田种植后茬玉米试验并系统进行相关数据的采集与整理。玉米播种日期分别为 2010 年 4 月 22 日与 2012 年 4 月 20 日, 收获日期分别为 2010 年 9 月 28 日与 2012 年 10 月 2 日。供试玉米品种为‘吉祥 1 号’。

试验设 4 个处理, 即 4 种秸秆还田方式: 25~30 cm 高茬收割立茬免耕(NTSS)、25~30 cm 高茬等量秸秆覆盖免耕(NTS)、25~30 cm 高茬等量秸秆翻耕(TIS), 以传统无秸秆还田翻耕(CT)为对照, 3 次重复。2009 年和 2011 年小麦收获时根据试验处理采取相应秸秆处理方式, 2010 年与 2012 年种植玉米, 形成小麦-玉米轮作体系, 玉米收获后, 秸秆移除农田。玉米播种密度为 82 500 株·hm⁻², 小区面积 48 m²(4.8 m×10 m)。传统无留茬翻耕及高茬等量秸秆翻耕处理于小麦收获后翻耕, 翻耕深度均为 30 cm, 翌年撒施底肥, 机械耙耱、覆膜; 免耕秸秆还田(高茬收割立茬免耕、高茬等量秸秆覆盖免耕)即小麦高茬收割后免耕, 翌年撒施底肥, 机械旋耕、耙耱、覆膜, 4 月下旬运用简易滚轮穴播机播种玉米。所有处理在玉米出苗后, 2~3 叶期间苗, 4~5 叶期定苗, 其他田间管理措施同地方玉米高产田。

灌溉及施肥制度同地方高产田一致, 即灌溉制度为冬灌水 1 200 m³·hm⁻², 在玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期、开花期、灌浆期分别补灌 900 m³·hm⁻²、750 m³·hm⁻²、900 m³·hm⁻²、750 m³·hm⁻²和 750 m³·hm⁻²。总施 N 量为 450 kg·hm⁻², 其中基肥、大喇叭口期追肥、灌浆期追肥分别按 3 : 6 : 1 分施; 追肥时, 用点播器在距离玉米茎秆约 10 cm 处打孔, 将 N 肥施入约 12 cm 深的空隙中, 埋土即可。施 P₂O₅ 225 kg·hm⁻², 全作基肥。

1.3 测定项目与计算方法

1.3.1 叶日积(LAI-D)

每隔约 20 d, 在试验处理小区内用“S”型法选取长势均匀、代表性玉米植株进行定期观测(抽雄期以及抽雄之前 10 株, 抽雄后 5 株), 先测定每株各叶片

的叶长(a_i)和最大叶宽(b_i), 叶面积指数(LAI)由下式求得:

$$LAI = 0.75 \times P \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) \quad (1)$$

式中: 0.75 为校正系数, P 为玉米种植密度, a 和 b 分别为叶片的长和宽, i 为叶片个数。

然后借助 LAI 由下式中求得 LAI-D:

$$LAI-D = \sum_{i=1}^n (LAI_i \times D_i) \quad (2)$$

式中, LAI_i 为第 i 个生育阶段的平均叶面积, D_i 为第 i 个生育阶段所持续的时间。

1.3.2 光能利用率(LUE)

$$LUE = H \times Y / \sum Q \times 100\% \quad (3)$$

式中: Y 为玉米籽粒与秸秆产量(kg·hm⁻²), 每小区单独收获, 测定籽粒与秸秆产量; H 为籽粒与秸秆的产出能量折算参数(J·kg⁻¹), 玉米籽粒取 16.3×10⁶ J·kg⁻¹, 玉米秸秆取 14.6×10⁶ J·kg⁻¹[19]; $\sum Q$ 为生长期间的太阳总辐射(MJ·m⁻²), 通过气象资料获得。

1.3.3 经济效益

试验过程中, 详细记载各种栽培措施下的玉米播前整地、田间管理、施肥、灌溉、病虫害防治、收获等各个环节的用工、肥料、农药、灌溉量等投入情况, 收获时进行考种并实测收获商品玉米籽粒与秸秆产量, 计算分析各种栽培措施下的成本及其产值、纯收益和产投比。农产品、生产资料价格、用工费等按当时市价计算。按下式计算水分效益和生产力:

$$\text{单方水效益} = \text{纯收益} / \text{全生育期耗水量} \quad (4)$$

$$\text{水分生产力} = \text{籽粒产量} / \text{灌溉水量} \quad (5)$$

1.4 数据统计

数据采用 Microsoft Excel 2007 整理、汇总, 用 SPSS 17.0 进行方差分析、显著性检验及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同小麦秸秆还田方式对玉米叶日积的影响

小麦免耕秸秆还田可显著提高玉米的总叶日积(LAI-D), 2010 年与 2012 年, 免耕秸秆还田(NTSS、NTS)处理玉米的全生育期总 LAI-D 较传统无秸秆还田处理(CT)分别提高 11.2%~14.5%与 16.3%~20.8%, 翻耕秸秆还田(TIS)比 CT 处理提高 6.0%~7.5%(表 1)。3 种小麦秸秆还田处理中, NTSS、NTS 比 TIS 处理总 LAI-D 分别提高 4.9%~6.6%、9.7%~12.4%, 表明免耕秸秆还田利于增大玉米冠层。

就玉米不同生育阶段而言, 大喇叭口期之前

(2010年6月30日, 2012年6月27日), NTSS、NTS处理玉米的叶日积均小于传统耕作, 降低幅度分别达到 5.9%~21.4%、20.1%~23.1%。大喇叭口期至吐丝期(2010年6月30日—7月20日; 2012年6月27日—7月17日), NTSS、TIS叶日积与CT相当, 但NTS比CT提高 4.9%~14.3% ($P < 0.05$)。相反, 吐丝期之后(2010年7月20日, 2012年7月17日), NTSS、

NTS、TIS处理 LAI-D 均高于CT, 提高比例分别为 26.3%~28.1%、29.7%~33.7%、12.7%~14.0%, 以NTS提高作用最明显, 比TIS高 15.1%~17.3%。因此, 小麦秸秆免耕覆盖还田减小了玉米大喇叭口期之前的叶日积, 增大了吐丝期之后的叶日积, 有效调控玉米前后生育时期的生长发育动态关系, 以NTS调控效应最明显, 为后茬玉米高产奠定了生物学基础。

表 1 不同小麦秸秆还田方式下玉米各生育阶段的叶日积差异

Table 1 Leaf area duration (LAI-D) of maize at each growth stage under different wheat straw retention patterns

年份 Year	处理 Treatment	日期(月-日) Date (month-day)								合计 Sum
		05-01-05-06	05-06-05-26	05-26-06-10	06-10-06-30	06-30-07-20	07-20-08-10	08-10-09-05	09-05-09-25	
2010	NTSS	0.18c	6.79c	16.05c	50.40b	90.21b	115.87b	131.70a	79.78b	490.99ab
	NTS	0.18c	6.21c	15.08c	50.74b	94.85a	122.32a	138.99a	85.15a	513.52a
	TIS	0.23b	9.02b	18.76b	54.78ab	89.92b	107.04c	118.27b	70.14c	468.16bc
	CT	0.27a	10.53a	21.71a	59.42a	90.46b	100.62d	102.93c	55.67d	441.61c
		05-01-05-05	05-05-05-25	05-25-06-09	06-09-06-27	06-27-07-17	07-17-08-11	08-11-09-03	09-03-09-26	合计 Sum
2012	NTSS	0.22b	5.76c	11.98d	35.67b	90.27b	120.94a	127.54a	101.85a	494.24b
	NTS	0.20b	5.37c	14.50b	45.48a	100.97a	124.18a	126.77a	103.88a	521.34a
	TIS	0.24b	6.75b	15.61ab	42.62a	90.28b	110.10b	112.48b	85.64b	463.72c
	CT	0.50a	8.37a	16.88a	44.17a	88.33b	102.13c	100.13c	71.32c	431.83d

数据后不同字母表示同一年度不同处理在 0.05 水平下差异显著。NTSS: 高茬收割立茬免耕; NTS: 高茬等量秸秆覆盖免耕; TIS: 高茬等量秸秆翻压; CT: 传统耕作无秸秆还田。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year at 0.05 probability level. NTSS: no tillage with straw standing; NTS: no tillage with straw covering; TIS: tillage with straw incorporation; CT: conventional tillage without straw retention.

2.2 前茬小麦秸秆还田方式对后作玉米产量及经济效益的影响

2.2.1 产量表现

与传统无秸秆还田翻耕(CT)处理相比, 秸秆还田显著提高了玉米的籽粒产量(表 2)。两个试验年度, 免耕还田(NTSS、NTS)处理分别增产 12.0%~13.9%和 13.7%~17.5%, 翻耕还田(TIS)处理增产 4.4%~11.3%, 增产效果显著。3 种秸秆还田处理中均以小麦秸秆 25~30 cm 高茬等量覆盖免耕处理(NTS)的籽粒产量最高, 分别达到 13 470 kg·hm⁻²与 13 247 kg·hm⁻², 较 TIS 提高 5.7%~9.0%。说明小麦秸秆 25~30 cm 高茬等量覆盖配合免耕有利于进一步提高玉米的籽粒产量。

2.2.2 经济效益

因劳力与机械投入的不同, 各处理总投入有明显差异(表 2)。传统无秸秆还田翻耕处理(CT)较小麦秸秆免耕还田(NTSS、NTS)总投入分别增加 5.1%~5.3%、5.9%~6.1%, 其中, 劳动力与机械投入 CT 较 NTSS、NTS 高 10.2%~10.6%、11.6%~12.0%, 说明传统耕作处理对劳动力与机械需求较大。随着总投入的增加, 其总产值降低, NTSS、NTS 的总产值较 CT 增多 9.7%~13.3%(高 3 049~3 643 元·hm⁻²)、

10.2%~16.4%(高 3 195~4 477 元·hm⁻²), 比 TIS 高 3.0%~7.4%(高 906~2 380 元·hm⁻²)。与产值相似, NTSS、NTS 的纯收益比 CT 提高 20.9%~35.5%(增加 3 713~5 200 元·hm⁻²), 比 TIS 提高 7.9%~15.7%(增加 1 384~2 957 元·hm⁻²)。同样, NTSS、NTS 处理的产投比较 CT 提高 15.4%~19.3%、16.8%~23.4%。两年度, 两种前茬小麦秸秆免耕还田处理(NTSS、NTS)中, 以 NTS 总投入低, 总产值、纯收益、产投比较高。以上结果说明, 河西绿洲灌区在劳动力和资源投入有保障的前提下前茬小麦秸秆免耕覆盖后作玉米获得较高的总产值, 具有较高的纯收益和产投比, 有利于农民增收, 可替代传统精耕细作种植方式, 提高农业效益。

2.3 玉米光能利用率对小麦秸秆还田方式的响应

光能利用率表示植物通过光合作用将所截获、吸收的光能转化为自身有机干物质的效率。2010 年与 2012 年春玉米全生育期内太阳总辐射量分别为 2 614 MJ·m⁻²与 2 712 MJ·m⁻², 玉米的光能利用率随着前茬小麦秸秆还田方式的变化而不同(图 1)。免耕秸秆还田(NTSS、NTS)处理的光能利用率比 CT 分别提高 4.5%~11.0%、5.3%~11.8%, 其中以前茬小麦

表 2 不同小麦秸秆还田方式下玉米产量及与经济效益
Table 2 Grain yield and economic benefits of maize under different wheat straw retention patterns

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)		产值 Output (¥·hm ⁻²)	投入 Cost (¥·hm ⁻²)				纯收益 Net return (¥·hm ⁻²)	产投比 Input-output ratio
		籽粒 Grain	秸秆 Straw		劳力与机械 Labor and machinery	农资 Agricultural materials	其他 Others	总和 Total		
2010	NTSS	13 054ab	16 688	31 012ab	5 611	4 650	1 830	12 091bc	18 922a	2.56ab
	NTS	13 470a	16 447	31 846a	5 538	4 650	1 817	12 005c	19 841a	2.65a
	TIS	12 760b	15 275	30 106b	6 055	4 650	1 863	12 568ab	17 538b	2.40b
	CT	11 460c	15 367	27 369c	6 203	4 650	1 875	12 728a	14 641c	2.15c
2012	NTSS	13 050a	15 692	34 328a	6 071	4 923	1 840	12 834bc	21 494a	2.67a
	NTS	13 247a	14 070	34 474a	5 992	4 923	1 825	12 740c	21 734a	2.71a
	TIS	12 157b	15 196	32 094b	6 529	4 923	1 865	13 317ab	18 777b	2.41b
	CT	11 650c	17 177	31 279b	6 690	4 923	1 885	13 498a	17 781b	2.32b

数据后不同小写字母表示同一年度不同处理在 0.05 水平差异显著。NTSS: 高茬收割立茬免耕; NTS: 高茬等量秸秆覆盖免耕; TIS: 高茬等量秸秆翻压; CT: 传统耕作无秸秆还田。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year at 0.05 probability level. NTSS: no tillage with straw standing; NTS: no tillage with straw covering; TIS: tillage with straw incorporation; CT: conventional tillage without straw retention.

秸秆免耕覆盖(NTS)后作玉米的光能利用率最高,说明可通过优化秸秆还田方式及耕作措施,如本研究中的免耕小麦秸秆覆盖还田方式可增加春玉米对光资源的利用,具有较高的光能利用率。

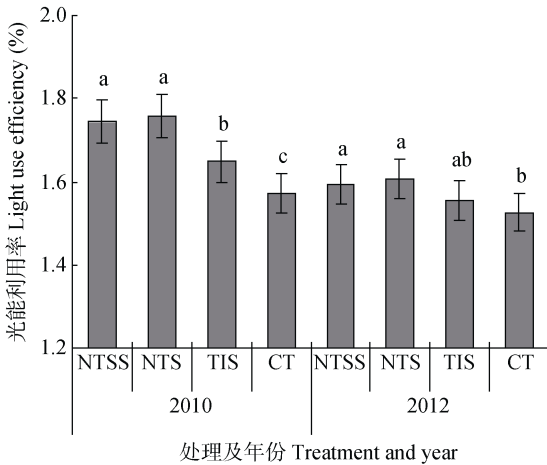


图 1 不同小麦秸秆还田方式下玉米的光能利用率
Fig. 1 Light use efficiency (LUE) of maize under different wheat straw retention patterns

不同小写字母表示同一年度不同处理在 0.05 水平差异显著。NTSS: 高茬收割立茬免耕; NTS: 高茬等量秸秆覆盖免耕; TIS: 高茬等量秸秆翻压; CT: 传统耕作无秸秆还田。Different lowercase letters indicate significant differences among the treatments within the same year at 0.05 probability level. NTSS: no tillage with straw standing; NTS: no tillage with straw covering; TIS: tillage with straw incorporation; CT: conventional tillage without straw retention.

2.4 不同小麦秸秆还田方式对玉米水分生产力及单方水效益的影响

2.4.1 水分生产效益

小麦秸秆还田可提高玉米的水分生产力(图 2A)。2 种小麦秸秆免耕还田处理(NTSS、NTS)的水

分生产力比传统无秸秆还田翻耕(CT)分别增加 12.0%~13.9%、13.7%~17.5%, 秸秆翻耕还田处理(TIS)比 CT 提高 4.5%~11.3%; 3 种秸秆还田处理中,以 NTS 水分生产力最高,比 TIS 高 5.6%~9.0%。说明在灌溉量相同情况下,小麦秸秆免耕覆盖利于提高单位灌溉水产生籽粒产量的能力。

2.4.2 单方水效益

与水分生产效益相似,运用单方水效益表示单位耗水产生的纯收益(图 2B)。2 种小麦秸秆免耕还田处理(NTSS、NTS)单方水效益比传统无秸秆还田翻耕(CT)分别提高 21.7%~26.2%、25.6%~33.1%, 秸秆翻耕还田(TIS)比 CT 提高 6.1%~21.3%; 3 种秸秆还田处理中,以 NTS 提高单方水效益最高,比 TIS 高 9.7%~18.3%。表明小麦秸秆免耕覆盖通过提高纯收益、降低耗水而提高单方水效益。

2.5 作物叶日积与籽粒产量及光能利用率的相关关系

两个试验年度,不同小麦秸秆还田后茬玉米光能利用率与全生育期总叶日积呈正相关关系,具有显著相关性(图 3)。玉米全生育期内的群体总叶日积与其籽粒产量均呈显著二次相关关系,当总叶日积在 0~547、0~555 范围内时,随群体总叶日积的增大,籽粒产量呈持续增大趋势;当总叶日积超过 547、555 时,群体籽粒产量随之下降。以上结果说明,在试验设计的农艺措施范围内,光合源越大,有助于干物质的积累,利于光能利用率的提高。然而,并非冠层越大越利于籽粒产量的提高,本研究表明群体保持适宜大小的冠层结构有利于提高群体籽粒产量。证实叶日积分析中所得,小麦秸秆覆盖

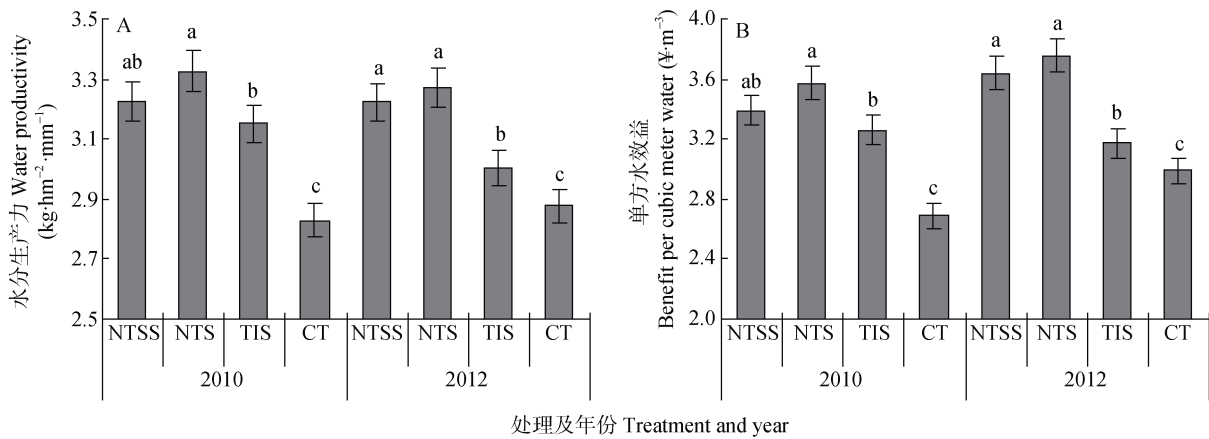


图 2 不同小麦秸秆还田方式下玉米的水分生产力(A)和单方水效益(B)

Fig. 2 Water productivity (A) and benefit per cubic meter water (B) of maize under different wheat straw retention patterns. 不同小写字母表示同一年度不同处理在 0.05 水平差异显著。NTSS: 高茬收割立茬免耕; NTS: 高茬等量秸秆覆盖免耕; TIS: 高茬等量秸秆翻压; CT: 传统耕作无秸秆还田。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments within the same year at 0.05 probability level. NTSS: no tillage with straw standing; NTS: no tillage with straw covering; TIS: tillage with straw incorporation; CT: conventional tillage without straw retention.

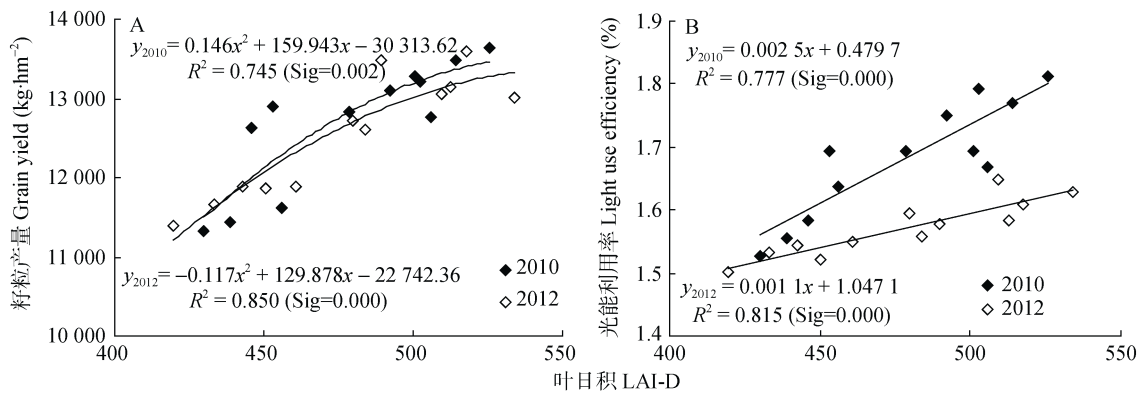


图 3 玉米叶日积与籽粒产量及光能利用率的相关关系

Fig. 3 Relationships between leaf area duration (LAI-D) and grain yield (A), light use efficiency (B) of maize

免耕(NTS)减小了玉米大喇叭口期之前的叶日积,增大了吐丝期之后的叶日积,有效调控玉米前后生育时期的生长发育动态关系,为后茬玉米高产奠定了基础。

3 讨论

叶面积指数的大小和动态直接影响作物冠层光截获,从而影响光能利用率,是作物获得高产稳产的基础^[20],提高叶日积(LAI-D)与延长叶面积高值持续时间是作物获得高产及高光能利用率的重要原因^[21]。作物群体光能利用率反映了作物干物质生产和光合能力,与产量密切相关^[20]。国内外通过设置不同种植方式^[17]、密植效应^[16]对作物光能利用率与产量关系进行了大量研究,但有关耕作措施对作物光能利用的研究较少。大量研究表明秸秆覆盖会推迟作物生育进程^[22],减弱光对地面的照射强度,使土壤吸热少升温慢,降低土壤温度,延缓作

物生育进程^[23-24]。耕作方式影响作物生育进程,与传统翻耕秸秆不还田相比,免耕处理推迟了作物生育进程^[25],而旋耕秸秆还田和翻耕秸秆还田对作物生育进程影响不大^[26]。这主要是由于免耕下秸秆覆盖地表降低了土壤温度,而秸秆还田下的旋耕和翻耕秸秆与土壤混合形成疏松的耕层,地表无秸秆覆盖,耕层土壤升温快有利于作物生长^[27]。而免耕秸秆还田是在免耕的基础上,将作物秸秆覆盖在地表,能够激发土壤微生物活性,使土壤的理化性质和生物学特性发生变化^[27-28],通过改善农田土壤环境而促进作物对水分养分的吸收,在生育后期存在贪青晚熟的现象,延长绿色叶片的功能期,延长光合作用时间,集约利用光热资源,延长籽粒灌浆时间,从而提高作物产量^[29]。本研究发现,前茬免耕秸秆还田降低了后作玉米大喇叭口期之前的叶日积,保持了吐丝期之后较高的叶日积,以免耕秸秆覆盖还田(NTS)的调控效应最为突出,这是因为免耕秸秆

覆盖还田前期低温利于玉米根系生长^[30], 不利于地上部生长发育, 造成较低的光合源。而吐丝期之后, 传统地膜覆盖在玉米开花灌浆期造成玉米根区极端的土壤温度^[31], 以及生育前期水分养分过度消耗, 后期养分不足, 导致后期根系及叶片发生早衰现象, 造成光合源相对较小; 而免耕秸秆还田后期适宜的土壤温度, 以及玉米生育前期生长慢, 养分消耗少, 实现养分“错峰分配”, 满足玉米生育后期旺盛生长的养分需求, 提高了吐丝期之后的叶日积, 说明免耕秸秆还田玉米增产主要发生在生育后期。前人研究发现, 高产玉米吐丝后叶日积占总叶日积的 50% 以上^[32]。本研究中小麦秸秆还田处理玉米吐丝后叶日积占总叶日积的 63.1%~70.9%, 以小麦免耕秸秆覆盖还田(NTS)玉米吐丝后所占比例最大, 为玉米增产奠定了生物学基础, 其高产效应已被证实^[7]。通过作物光能利用率与全生育期总叶日积及籽粒产量的相关性分析可知, 不同小麦秸秆还田玉米光能利用率与全生育期总叶日积呈正相关关系, 这与前人的研究结果一致^[10]。说明通过优化耕作措施, 正如本研究中的小麦秸秆免耕覆盖可扩大地上部光合源, 延长光合源的功能期, 延缓叶片衰老, 促进光能利用, 从而提高光能利用率。然而, 并非冠层越大越利于籽粒产量的提高, 因为籽粒产量的形成取决于作物各营养器官干物质累积量向籽粒器官的转运量^[33], 已有研究表明, 前茬小麦秸秆还田轮作玉米使得玉米吐丝前干物质主要分配在叶片、茎秆、叶鞘中, 而吐丝之后主要转向穗部籽粒灌浆, 其中, 高茬等量秸秆覆盖免耕处理在玉米吐丝前促进了干物质向各营养器官的运转, 而吐丝后又加快了穗部籽粒灌浆, 利于高产^[7]。因此, 本研究表明群体保持适宜大小的冠层结构(叶日积在 547~555 范围内)有利于提高群体籽粒产量。正如叶日积分析中所得, 小麦秸秆覆盖免耕(NTS)减小了玉米大喇叭口期之前的叶日积, 增大了吐丝期之后的叶日积, 有效调控玉米前后生育时期的生长发育动态关系, 为后茬玉米高产奠定了基础。

经济效益是农民增收的最终结果, 也是影响作物生产可持续发展的重要衡量指标。免耕通过节约播种至收获期间的机械作业量和劳力投入, 实现节本增效, 是国内外较为普遍的一种轻简化栽培方式, 可降低作物生产成本, 改善土壤理化性状, 利于作物生长, 提高作物产量与纯收益, 增加农民收入^[6], 对促进玉米生产发展具有重要意义。另外, 少耕秸秆覆盖可以有效地保持土壤水分, 降低无效耗水与全生育期总耗水量, 提高产量^[34], 秸秆与地膜双元覆盖进一步加强了其保

水效应, 可作为提高单方水效益的可行途径。本研究表明, 与传统处理相比, 小麦秸秆免耕还田(NTSS、NTS)可降低生产成本 10.2%~12.0%, 提高总产值 9.7%~16.4%(高 3 049~4 477 元·hm⁻²), 增加纯收益 20.9%~35.5%(增加 3 713~5 200 元·hm⁻²), 使得产投比提高 15.4%~23.4%, 水分生产力提高 12.0%~17.5%, 单方水效益提高 21.7%~33.1%。说明河西绿洲灌区在劳动力和资源投入有保障的前提下前茬小麦秸秆免耕覆盖后作玉米获得较高的总产值, 具有较高的纯收益和产投比, 有利于农民增收, 可替代传统精耕细作种植方式, 提高农业效益。进一步证实了小麦免耕秸秆还田后种植地膜玉米的可行性, 具有较强的推广应用价值。

4 结论

秸秆免耕还田减小了玉米生育前期(大喇叭口期之前)的叶日积, 增大了生育后期(吐丝期之后)的叶日积, 有效调控玉米前后生育时期的生长发育动态关系。秸秆还田明显提高了玉米全生育期光能利用率, 以秸秆覆盖还田配合免耕(NTS)提高作用最明显, 提高 5.3%~11.8%。秸秆还田有利于提高玉米的籽粒产量, 以 NTS 处理增产效应较大, 2010 年与 2012 年度籽粒产量分别达 13 470 kg·hm⁻² 和 13 247 kg·hm⁻², 较传统耕作增幅为 13.7%~17.5%。秸秆免耕还田(NTSS、NTS)可降低生产成本, 从而提高纯收益与产投比, 以 NTS 最为突出, 比传统耕作分别高 22.2%~35.5%(高 3 953~5 200 元·hm⁻²)与 16.8%~23.4%, 水分生产力和单方水效益分别提高 13.7%~17.5%和 25.6%~33.1%。因此, 25~30 cm 小麦秸秆免耕覆盖(NTS)可作为河西绿洲灌区发展节本增效玉米生产关键技术。

参考文献 References

- [1] 卢秉林, 包兴国, 张久东, 等. 河西绿洲灌区玉米与绿肥间作模式对作物产量和经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014, (2): 67-71
LU B L, BAO X G, ZHANG J D, et al. Effects of different intercropping systems of corn and green manure on crop yield and economic benefit in Hexi oasis irrigation[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014, (2): 67-71
- [2] GŁĄB T, ŚCIGALSKA B, LABUZ B. Effect of crop rotation on the root system morphology and productivity of triticale (*Triticosecale* Wittm)[J]. Journal of Agricultural Science, 2014, 152(4): 642-654
- [3] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 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[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 2898-2908
YIN W, CHEN G P, CHAI Q, et al. Responses of soil water and temperature to previous wheat straw treatments in plastic

- film mulching maize field at Hexi Corridor[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(15): 2898–2908
- [4] ZHANG S L, LI P R, YANG X Y, et al. Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 112(1): 92–97
- [5] CHAI Q, GAN Y T, TURNER N C, et al. Water-saving innovations in Chinese agriculture[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 126: 149–201
- [6] 周怀平, 解文艳, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 321–330
ZHOU H P, XIE W Y, GUAN C L, et al. Effects of long-term straw-returning on corn yield, economic benefit and water use in arid farming areas[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 321–330
- [7] 殷文, 冯福学, 赵财, 等. 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[J]. *作物学报*, 2016, 42(5): 751–757
YIN W, FENG F X, ZHAO C, et al. Effects of wheat straw returning patterns on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of rotation maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 751–757
- [8] MONNEVEUX P, QUILLÉROU E, SANCHEZ C, et al. Effect of zero tillage and residues conservation on continuous maize cropping in a subtropical environment (Mexico)[J]. *Plant and Soil*, 2006, 279(1/2): 95–105
- [9] HUANG G B, ZHANG R Z, LI G D, et al. Productivity and sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems[J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(1): 43–55
- [10] LOOMIS R S, WILLIAMS W A, DUNCAN W G, et al. Community architecture and the productivity of terrestrial plant communities[M]//SANPIETRO A, GREER F A, ARMY T J. *Harvesting the Sun. Photosynthesis in Plant Life*. New York: Academic Press, 1967: 291–308
- [11] 沈允钢. 植物的光能利用问题[J]. *科学通报*, 1961, (10): 46–50
SHEN Y G. The problem of photosynthesis of plants[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1961, (10): 46–50
- [12] 黄高宝. 作物群体受光结构与作物生产力研究[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(1): 59–65
HUANG G B. A review of the researches of crop colony structure and light distribution in relation to crop productivity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(1): 59–65
- [13] 章家恩. 作物群体结构的生态环境效应及其优化探讨[J]. *生态科学*, 2000, 19(1): 30–35
ZHANG J E. Discussion on the eco-environmental effects of crop community structure and its optimization[J]. *Ecologic Science*, 2000, 19(1): 30–35
- [14] 肖新, 赵言文, 胡锋, 等. 南方丘陵典型季节性干旱区节水稻作模式生态系统功能特征研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 74–78
XIAO X, ZHAO Y W, HU F, et al. Study on function of different water-saving rice model ecosystems in southern China seasonal drought hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 74–78
- [15] FLETCHER A L, JOHNSTONE P R, CHAKWIZIRA E, et al. Radiation capture and radiation use efficiency in response to N supply for crop species with contrasting canopies[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 126–134
- [16] 周婷婷, 李军, 司政邦. 种植密度与品种类型对渭北旱地春玉米产量和光能利用的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(11): 54–62
ZHOU T T, LI J, SI Z B. Effects of planting density and variety on growth and RUE of spring maize in Weibei highland[J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2015, 43(11): 54–62
- [17] 刘正芳, 柴强. 带型及施氮对玉米间作豌豆光能利用率的影响[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(3): 367–371
LIU Z F, CHAI Q. Response of solar radiation use efficiency on nitrogen application rates and percentage of intercropped maize and pea[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(3): 367–371
- [18] 王旭清, 王法宏, 董玉红, 等. 不同种植方式麦田生态效应研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 119–122
WANG X Q, WANG F H, DONG Y H, et al. Study on the ecological effect in wheat field of different planting patterns[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 119–122
- [19] YIN W, CHAI Q, GUO Y, et al. Reducing carbon emissions and enhancing crop productivity through strip intercropping with improved agricultural practices in an arid area[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 197–208
- [20] 杨国敏, 孙淑娟, 周勋波, 等. 群体分布和灌溉对冬小麦农田光能利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1868–1875
YANG G M, SUN S J, ZHOU X B, et al. Effects of population distribution pattern and irrigation schedule on radiation utilization in winter wheat farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1868–1875
- [21] REDDY M S, WILLEY R W. Growth and resource use studies in an intercrop of pearl millet/groundnut[J]. *Field Crops Research*, 1981, 4: 13–24
- [22] 殷文, 陈桂平, 柴强, 等. 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[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 180–187
YIN W, CHEN G P, CHAI Q, et al. Effect of tillage and straw retention mode on seedling emergence and yield of spring wheat in the Hexi Irrigation Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 180–187
- [23] 陈素英, 张喜英, 刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J]. *中国农业气象*, 2002, 23(4): 34–37
CHEN S Y, ZHANG X Y, LIU M Y. Soil temperature and soil water dynamics in wheat field mulched with maize straw[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2002, 23(4): 34–37
- [24] 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[J]. *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 dryland[J]. *Transactions of the*

- CSAE, 2005, 21(7): 15-19
- [25] 郭瑶, 柴强, 殷文, 等. 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[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 69-77
GUO Y, CHAI Q, YIN W, et al. Effect of wheat straw return to soil with zero-tillage on maize yield in irrigated oases[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 69-77
- [26] 孔凡磊, 袁继超, 张海林, 等. 耕作方式对华北两熟区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(9): 1612-1618
KONG F L, YUAN J C, ZHANG H L, et al. Effect of tillage practice on growth and development and yield of winter wheat in double cropping area in North China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1612-1618
- [27] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 94-96
LI L L, HUANG G B, ZHANG R Z, et al. Effects of no-till with stubble retention on soil water regimes in rainfed areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 94-96
- [28] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1785-1792
ZHAO Y L, GUO H B, XUE Z W, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1785-1792
- [29] 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
- [30] 刘立晶, 高焕文, 李洪文. 玉米—小麦一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 70-73
LIU L J, GAO H W, LI H W. Conservation tillage for corn-wheat two crops a year region[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 70-73
- [31] BU L D, ZHU L, LIU J L, et al. Source-sink capacity responsible for higher maize yield with removal of plastic film[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(3): 591-598
- [32] 陈传永, 董志强, 赵明, 等. 低温冷凉地区超高产春玉米群体生长分析研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 75-79
CHEN C Y, DONG Z Q, ZHAO M, et al. Researches of analysis and growth on spring maize with super-high yield in cold region[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 75-79
- [33] 李利利, 张吉旺, 董树亭, 等. 不同株高夏玉米品种同化物积累转运与分配特性[J]. 作物学报, 2012, 38(6): 1080-1087
LI L L, ZHANG J W, DONG S T, et al. Characteristics of accumulation, transition and distribution of assimilate in summer maize varieties with different plant height[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(6): 1080-1087
- [34] YIN W, YU A Z, CHAI Q, et al. Wheat and maize relay-planting with straw covering increases water use efficiency up to 46%[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(2): 815-825