

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190813

吕汉强, 于爱忠, 柴强. 绿洲灌区玉米产量及水分利用对绿肥还田方式的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 671–679

LYU H Q, YU A Z, CHAI Q. Response of maize yield and water use to different green manure utilization patterns in arid oasis irrigation area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 671–679

绿洲灌区玉米产量及水分利用对绿肥还田方式的响应*

吕汉强, 于爱忠**, 柴强

(甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室 兰州 730070)

摘 要: 针对绿洲灌区小麦-玉米长期连作, 麦后休闲期长、光热水资源利用效率不高等问题, 研究麦后复种绿肥对轮作玉米产量及水分利用效率的影响有重要意义。在石羊河流域, 于 2017—2019 年度通过田间试验研究了麦后复种绿肥的不同还田利用方式(全量翻压、地表覆盖免耕、地上部收获后根茬翻压、地上部收获后免耕和不复种绿肥传统翻耕对照)对后茬玉米产量形成和水分利用特征的影响。两年试验结果表明, 绿肥地表覆盖免耕和全量翻压处理玉米籽粒产量平均达 $14\,274.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $14\,687.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 较不复种绿肥翻耕处理(对照)显著提高 18.2%和 20.4%($P<0.05$)。绿肥地表覆盖免耕条件下, 玉米穗数、穗粒数、百粒重分别较不复种绿肥翻耕处理(对照)平均高 5.4%、9.6%、20.8%($P<0.05$), 且较根茬还田处理(翻压、免耕)增幅显著。与此同时, 绿肥地表覆盖免耕和全量翻压显著增加玉米叶面积指数、干物质累积量和平均净同化率。绿肥地表覆盖免耕处理水分利用效率平均达 $24.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 较不复种绿肥翻耕处理(对照)显著提高 29.9%($P<0.05$), 该处理较不复种绿肥翻耕处理(对照)显著提高玉米播前土壤贮水量 26.9%($P<0.05$), 平均达 280.7 mm, 且该条件下玉米全生育期耗水量显著低于其他绿肥还田处理。绿肥根茬还田处理(翻压、免耕)下, 玉米平均水分利用效率分别较不复种绿肥翻耕处理显著高 16.7%、16.0%($P<0.05$)。因此, 在干旱绿洲灌区, 麦后复种绿肥地表覆盖免耕获得玉米高产的同时, 实现了水资源的高效利用。

关键词: 小麦-玉米轮作; 绿肥利用方式; 玉米; 产量; 水分利用特征

中图分类号: S344

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Response of maize yield and water use to different green manure utilization patterns in arid oasis irrigation area*

LYU Hanqiang, YU Aizhong**, CHAI Qiang

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

Abstract: With the aim of long-term continuous cropping of wheat and maize in arid oasis irrigation areas, the fallow-period after

* 现代农业产业技术体系项目(CARS-22-G-12)、国家自然科学基金项目(31401350)和国家公益性行业(农业)科研专项项目(201503125-3)资助

** 通信作者: 于爱忠, 主要研究方向为节水农业、保护性耕作等。E-mail: yuaizh@gsau.edu.cn

吕汉强, 研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: 1131021518@qq.com

收稿日期: 2019-11-13 接受日期: 2020-01-16

* This study was supported by the Special Fund for the Industrial Technology System Construction of Modern Agriculture of China (CARS-22-G-12), the National Natural Science Foundation of China (31401350) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503125-3).

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

Received Nov. 13, 2019; accepted Jan. 16, 2020

wheat harvest is long and the utilization efficiency of light, heat, and water resources is relative low; thus, it is important to study the effects of different green manure utilization patterns on maize yield and water use characteristics. In the Shiyang River basin, the effects of different green manure utilization patterns on the yield formation and water use characteristics of maize were studied through a field experiment on the wheat-green manure-maize rotation system. Different green manure utilization patterns included tillage with full quantity of green manure incorporated in the soil (TG), no-tillage with full quantity of green manure mulched on the soil surface (NTG), above ground green manure harvested and tillage with root incorporated in the soil (T), no-tillage with above ground green manure harvested (NT), and conventional tillage without green manure (CT) as the control. The results showed that the average maize grain yield for treatments of NTG and TG reached $14\,274.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $14\,687.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively, which was 18.2% and 20.4% higher, respectively, than that of CT. This is mainly due to the fact that the number of ears, seed number per ear, and seed weight of maize for NTG were 5.4%, 9.6%, and 20.8% higher, respectively, than those of CT, and the effect was significantly higher than that of root utilization patterns (treatments T and NT). Meanwhile, TG and NTG treatments significantly increased maize leaf area index, dry matter accumulation, and average net assimilation rate. The average water use efficiency of the NTG treatment reached $24.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, which was 29.9% higher than that of CT, which significantly increased the soil water storage before maize sowing to 26.9%, with an average of 280.7 mm. In addition, under NTG treatment, the water consumption of maize during the whole growth period was significantly lower than that of the other green manure treatments. Under the conditions of green manure root utilization (treatments T and NT), the water use efficiency of maize was 16.7% and 16.0% higher, respectively, than that of CT. Therefore, in the arid oasis irrigation area, for the wheat-green manure-maize rotation system, employing no-till with full quantity of green manure mulched on the soil surface achieves high yield of maize while achieving efficient use of water resources.

Keywords: Wheat-maize rotation; Green manure utilization patterns; Maize; Yield; Water use characteristics

目前, 全球范围内小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)播种面积达 3.77 亿 hm^2 。国内小麦玉米种植面积保持稳定, 但因大面积长期连作、频繁耕作导致产品产量和品质下滑等问题, 已成为影响区域农业可持续发展的重要因素^[1-4]。绿肥是中国传统农业的重要组成部分, 许多研究表明, 绿肥促进作物生长发育, 提高产量、改善品质的作用显著^[5-7]。其中, 豆科与禾本科作物搭配形成的种植模式中, 对禾本科作物产量的增产效应大多在 10% 以上, 增产的主要机理是其为禾本科作物生长发育创造了良好的土壤肥力条件^[8-10]。Danga 等^[11]研究表明, 短期豆科作物与谷类作物轮作, 豆科作物对土壤水分的消耗基本不对后茬作物的产量产生影响。在雨养农业区有研究表明, 种植绿肥自身耗水量较大导致土壤贮水量降低, 但后茬作物产量提升, 从而提高了作物水分利用效率, 绿肥地表覆盖翻压可提高土壤贮水量、减少作物耗水量、提高水分利用效率和产量^[12-13]。而针对不同区域、不同种植模式而言, 绿肥还田利用方式对主栽作物产量、水分利用特征的影响却存在明显差异^[14-16]。西北绿洲灌区是典型的一熟有余, 两季不足的农业区域, 有限降水集中在 7—9 月份, 春小麦收获后休闲季长, 光热水资源浪费严重。针对该区域典型种植模式的绿肥还田研究报道较少, 造成种植模式的优化缺乏必要理论依据。小麦收获后复种豆科绿肥可打破小麦玉米年际间同科作物连作, 是提高资源利用效率的有效途径。本研究探讨了麦后复种绿肥

不同还田利用方式对翌年轮作玉米产量形成及水分利用特征的影响, 以期对禾本科作物和豆科作物种植模式的构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究于 2017—2019 年度在甘肃农业大学武威绿洲试验基地($103^{\circ}5'E$, $37^{\circ}31'N$)进行。试验区位于河西走廊东端, 属寒温带气候干旱区, 海拔 1 776 m, 常年平均太阳辐射 $5.67\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均气温 $7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 $2\,985\text{ }^{\circ}\text{C}$), 年平均降雨量 156 mm, 降水主要集中在 7—9 月份, 年蒸发量约 2 400 mm, 雨热同季, 是典型的 1 熟有余、两熟不足的内陆干旱绿洲灌溉农业区。主栽作物主要以小麦、玉米为主, 作物收获后多采用传统翻耕。玉米生育期内降雨量如图 1 所示。

1.2 试验设计

本研究于 2017 年 3 月开始种植春小麦, 7 月份春小麦收获后翻耕复种箭筈豌豆(*Vicia sativa*), 于箭筈豌豆盛花期采用 4 种还田方式, 还田深度 30 cm, 翌年玉米播前旋耕后覆膜平作玉米。试验设置 5 个处理, 每个处理 3 个重复, 小区面积 54 m^2 ($6\text{ m}\times 9\text{ m}$), 随机区组排列, 具体试验处理及代码如表 1 所示。

为了消除年际气候因子变异对试验结果造成的影响, 在同一试验田设春小麦-玉米和玉米-春小

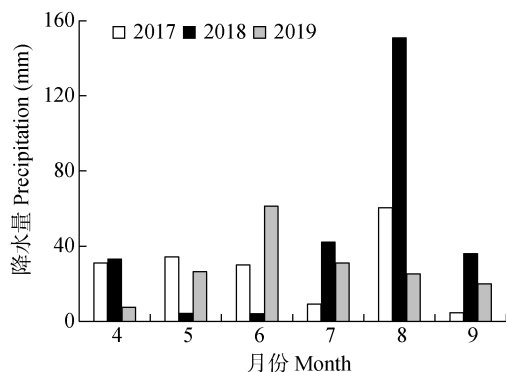


图 1 2017—2019 年研究区玉米生育期内月平均降雨量

Fig. 1 Monthly average precipitation during maize growth period in the study area from 2017 to 2019

麦两个轮作序列。春小麦-玉米轮作序列种植模式为 2017 年 3 月份种植春小麦, 7 月份春小麦收获后翻耕复种箭筈豌豆, 10 月份于绿肥盛花期还田, 2018 年 4 月份玉米播前旋耕后地膜覆盖平作玉米。玉米-春小麦轮作序列种植模式为 2017 年种植玉米, 2018 年 3 月种植春小麦, 7 月春小麦收获后翻耕复种箭筈豌豆, 10 月份于绿肥盛花期还田, 2019 年 4 月玉米播前旋耕后覆膜平作玉米。玉米播种密度为 $82\,500\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$, 行距 40 cm; 箭筈豌豆播量为 $75\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 条播, 行距 15 cm。供试春小麦品种为‘永良 4 号’, 玉米品种为‘先玉 335’, 箭筈豌豆品种为‘兰箭 2 号’。

表 1 不同试验处理的绿肥还田方式及作物种植方式

Table 1 Green manure utilization and crop planting patterns of different treatments in the experiment

处理 Treatment	绿肥还田及作物种植方式 Pattern of green manure utilization and crop planting
CT	春小麦收获后传统翻耕、休闲 Conventional tillage and leisure without green manure after spring wheat harvest
TG	春小麦 7 月收获后复种绿肥, 10 月绿肥全量翻压, 翌年 4 月覆膜平作玉米 Planting green manure after spring wheat harvest in July, tillage with full quantity of green manure incorporated in the soil in October, and flat planting maize with film mulching in April of the next year
T	春小麦 7 月收获后复种绿肥, 10 月地上部收获移除根茬翻压, 翌年 4 月覆膜平作玉米 Planting green manure after spring wheat harvest in July, harvesting and removing above ground green manure and tillage with root incorporated in the soil in October, and flat planting maize with film mulching in April of the next year
NTG	春小麦 7 月收获后复种绿肥, 10 月绿肥地表覆盖免耕, 翌年 4 月覆膜平作玉米 Planting green manure after spring wheat harvest in July, no-tillage with full quantity of green manure mulched on soil surface in October, and flat planting maize with film mulching in April of the next year
NT	春小麦 7 月收获后复种绿肥, 10 月绿肥地上部收获移除免耕, 翌年 4 月覆膜平作玉米 Planting green manure after spring wheat harvest in July, no-tillage with above ground green manure harvested and removed in October, and flat planting maize with film mulching in April of the next year

玉米采用膜下滴灌水肥一体化技术, 水表计量灌溉, 总灌水定额 405 mm, 分别在玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆初期、灌浆中期灌水 90 mm、75 mm、90 mm、75 mm、75 mm。施肥制度同当地高产田, 所有处理施肥量一致, 氮肥为尿素, 磷肥为磷酸二铵, 玉米施纯 N $360\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 按基肥: 大喇叭口期: 灌浆期=3: 5: 2 分施。施 P_2O_5 $180\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 全做基肥。复种绿肥不施肥。

1.3 测定指标和计算方法

1.3.1 土壤含水量

0~30 cm 土层采用烘干法测定, 每 10 cm 作为一个层次。30~110 cm 采用水分中子仪(NMM503DR CA 美国)测定, 每 20 cm 作为一个层次。玉米播种前和收获后按每小区各测定 1 次, 计算土壤贮水量(SWS)和作物耗水量(ET):

$$\text{SWS} = \sum_{i=1}^7 (h_i \times a_i \times \theta_i) \times 10 \quad (1)$$

式中: SWS 为土壤贮水量(mm), h 为土层厚度(cm), a

为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), θ 为土壤质量含水量, 10 为单位换算系数, i 为土壤层次。

1.3.2 作物耗水量(ET)

$$\text{ET} = P + I - \Delta S \quad (2)$$

式中: ET 为作物耗水量(mm), P 为作物生育期内降水量(mm), I 为作物生育期内灌水量(mm), ΔS 为作物播种前和收获后的土壤贮水量之差。

1.3.3 产量及产量构成因素

玉米成熟后按小区单独收获、风干后脱粒测产。在各处理小区内随机取样 20 株进行室内考种, 测定穗数、穗粒数、百粒重等产量性状。

1.3.4 水分利用效率^[17](WUE)

$$\text{WUE} = Y/\text{ET} \quad (3)$$

式中: Y 为玉米籽粒产量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), ET 为作物全生育期耗水量(mm)。

1.3.5 干物质累积量^[18]

从玉米苗期开始, 每隔 20 d 左右取样 1 次。每小区随机选取有代表性的玉米地上部 10 株, 在 105

℃烘箱中 30 min 杀青, 然后调至 80 ℃恒温连续烘干至恒重, 冷却后称量干物质重, 并计算平均净同化率(MNAR, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

$\text{NAR} = (\ln L_2 - \ln L_1) / (L_2 - L_1) \times (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)$ (4)
式中: NAR 为净同化率, L_2 、 L_1 为 t_2 、 t_1 时的叶面积, W_2 、 W_1 为 t_2 、 t_1 时的干物质重。

1.3.6 叶面积指数^[18](LAI)

选择每小区长势一致的植株标记, 采用长宽系数法测定, 从玉米苗期开始每隔 20 d 左右测定 1 次, 计算叶面积指数(LAI)和平均叶面积指数(MLAI)。

$$\text{LAI} = 0.75 \times P \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) / S \quad (5)$$

式中: 0.75 为校正系数, P 为玉米的种植密度, a 和 b 为叶片长度和宽度, i 为叶片个数, S 为土地面积。

1.4 数据统计

所有数据采用 Microsoft Excel 2010 整理汇总及图表制作, 使用 SPSS 20.0 软件进行单因素(one-way ANOVA)方差分析、Duncan 法进行多重比较 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 绿肥不同还田利用方式对玉米产量和产量构成因素的影响

麦后复种绿肥不同还田利用方式对玉米产量及产量构成因素影响显著(表 2)。绿肥还田处理增产效果最好, 全量翻压(TG)和地表覆盖免耕(NTG)平均产量达 $14\,687.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $14\,274.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较不复种绿肥翻耕处理(CT)显著增产 20.4%和 18.2%($P<0.05$),

该处理下穗数、穗粒数、百粒重均显著高于 CT($P<0.05$)。2018 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米穗数、穗粒数、百粒重及籽粒产量分别较 CT 高 6.4%、4.5%、21.0%、22.2%和 5.1%、8.9%、21.2%、20.2%, 且差异显著($P<0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, 玉米籽粒产量与 CT 无显著差异。2019 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米穗数、穗粒数、百粒重及籽粒产量分别较 CT 高 6.1%、14.2%、17.4%、18.7%和 5.7%、10.3%、20.4%、16.1%, 且差异显著($P<0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, 玉米籽粒产量分别较不复种绿肥翻耕处理高 11.1%和 12.0%($P<0.05$)。这说明相对于不复种绿肥, 无论采用翻压或地表覆盖, 绿肥全量还田均能提高主栽作物玉米产量。

2.2 玉米干物质累积量和平均净同化率对绿肥不同还田利用方式的响应

绿肥全量还田条件下, 全量翻压和地表覆盖免耕均提高了玉米干物质累积量(图 2)。两个试验年度, 绿肥全量还田, 玉米干物质累积量均显著高于根茬还田和不复种绿肥翻耕处理($P<0.05$), 但绿肥根茬还田处理玉米全生育期干物质累积量与不复种绿肥翻耕处理无显著差异。2018 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米拔节期至灌浆期(出苗后 35~135 d)干物质累积量分别较 CT 处理高 12.2%、12.3%($P<0.05$), 灌浆期至成熟期(出苗后 135~155 d), TG、NTG 比 CT 处理分别提高 39.0%、24.9%($P<0.05$)。2019 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米拔节期至灌浆期(出苗后 35~135 d)干物质累积量分别较 CT 处理提

表 2 不同绿肥还田方式下玉米产量及产量构成因素
Table 2 Maize yield and yield components under different green manure utilization patterns

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗数 Ear number ($\text{ears} \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Seed number per ear	百粒重 100-seed weight (g)
2018	CT	11 185.8±235b	73 256±1 431b	470±11.2b	32.0±2.6c
	NT	11 686.8±168b	74 274±1 325b	419±14.6c	37.6±3.1b
	NTG	14 015.3±423a	77 156±1 502a	516±10.5a	40.6±3.4a
	T	12 386.0±498b	74 413±1 322b	501±14.5a	34.1±2.9bc
	TG	14 372.7±154a	78 249±1 445a	492±16.5a	40.5±3.6a
2019	CT	12 198.9±142c	74 117±1 224b	478±18.6b	32.8±2.3c
	NT	13 861.2±201b	73 356±1 445b	546±10.5a	34.6±2.1b
	NTG	14 534.4±399a	78 595±1 448a	533±12.3a	41.2±3.5a
	T	13 717.5±195b	74 004±1 223b	514± 9.8ab	36.6±3.3ab
	TG	15 002.2±268a	78 891±1 523a	557± 9.1a	39.7±2.7a

不同处理的种植方式如表 1 所示。表中同列不同小写字母表示同一年份各处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。The planting method of each treatment is shown in table 1. Different lowercase letters in a column in the same year represent significant differences among treatments at $P < 0.05$ level.

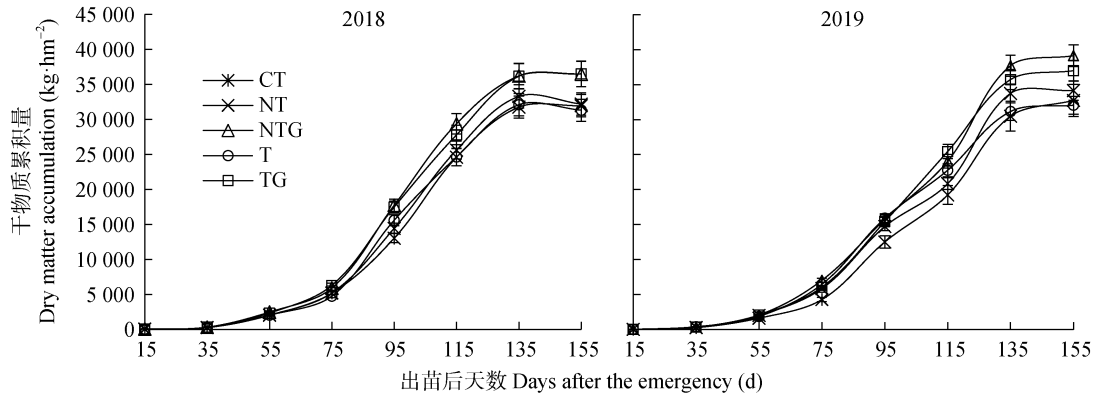


图 2 不同绿肥还田利用方式下玉米干物质累积量动态

Fig. 2 Dynamics of dry matter accumulation of maize under different green manure utilization patterns
不同处理的种植方式如表 1 所示。The planting method of each treatment is shown in table 1.

高 14.6%、19.1% ($P < 0.05$); 完熟期(出苗后 155 d), TG、NTG 较 CT 处理分别提高 11.5%、16.3% ($P < 0.05$)。这说明绿肥全量翻压或地表覆盖免耕较不复种绿肥翻耕均可提高后茬玉米干物质累积量, 且能够明显加快玉米干物质积累速率。

绿肥全量还田条件下平均净同化率显著高于不复种绿肥处理(图 3)。2018 年, TG、NTG 分别较 CT 处理高 19.3%、18.4% ($P < 0.05$); T、NT 较 CT 处理分别提高 13.0%、11.1% ($P < 0.05$)。2019 年, TG、NTG 较 CT 处理高 9.0%、12.7% ($P < 0.05$); T、NT 与 CT 处理无显著差异。

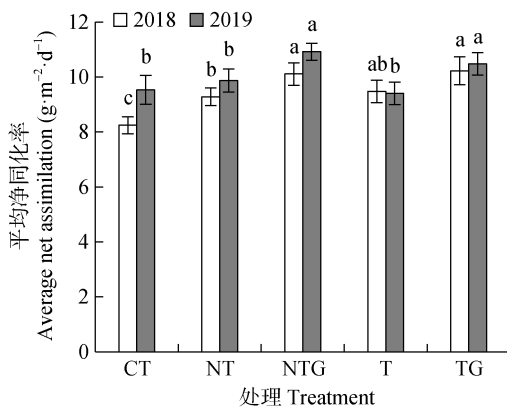


图 3 不同绿肥还田利用方式下玉米平均净同化率

Fig. 3 Average net assimilation rate of maize under different green manure utilization patterns

不同处理的种植方式如表 1 所示。不同小写字母表示同一年份不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。The planting method of each treatment is shown in table 1. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same year at $P < 0.05$ level.

2.3 玉米叶面积指数 (LAI) 和平均叶面积指数 (MLAI) 对绿肥不同还田利用方式的响应

绿肥全量还田提高了玉米生育中后期的叶面积指数, LAI 在抽雄吐丝期出现峰值(图 4)。2018 年绿

肥还田处理(TG、NTG)下, 大喇叭口期至吐丝期(6 月 30 日—7 月 20 日) LAI 峰值达到 6.53 和 6.67, 较 CT 分别提高 13.9%、16.9% ($P < 0.05$); 吐丝期之后(7 月 20 日之后) TG、NTG 较 CT 处理分别提高 20.2% 和 16.0% ($P < 0.05$); T 处理的 LAI 较 CT 高 7.4% ($P < 0.05$)。2019 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 大喇叭口期至吐丝期(6 月 30 日—7 月 20 日) LAI 峰值达 6.85 和 6.68, 较 CT 处理分别提高 16.4%、14.3% ($P < 0.05$); 吐丝期之后(7 月 20 日之后) TG、NTG 较 CT 处理分别提高 11.9% 和 15.3% ($P < 0.05$)。说明绿肥全量翻压或地表覆盖均可保证玉米生育后期的光合源功能, 为玉米高产奠定基础。

麦后复种绿肥不同还田利用方式对玉米平均叶面积指数 (MLAI) 影响显著(图 5)。两个试验年度, 绿肥全量翻压和地表覆盖处理 MLAI 最高。2018 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米 MLAI 分别较 CT 处理高 18.1% 和 14.2% ($P < 0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, MLAI 较 CT 分别高 6.0% 和 7.9% ($P < 0.05$)。2019 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 分别较 CT 处理高 13.4% 和 15.0% ($P < 0.05$); T、NT 与 CT 处理差异不显著。

2.4 绿肥不同还田利用方式下玉米总耗水量和播前土壤贮水量的差异

绿肥地表覆盖免耕处理较其他绿肥还田处理和不复种绿肥处理显著降低了玉米全生育期总耗水量(图 6)。2018 年 NTG 玉米全生育期总耗水量分别较 CT、TG、T、NT 处理降低 15.6%、10.1%、11.5%、7.3% ($P < 0.05$); NT 较 CT 处理显著降低 9.0%; CT、TG、T 处理差异不显著。2019 年 NTG 处理分别较 CT、TG、T、NT 处理降低 13.0%、6.2%、4.1%、5.5% ($P < 0.05$); TG、T、NT 处理分别较 CT 降低 7.3%、9.2%、8.0% ($P < 0.05$)。

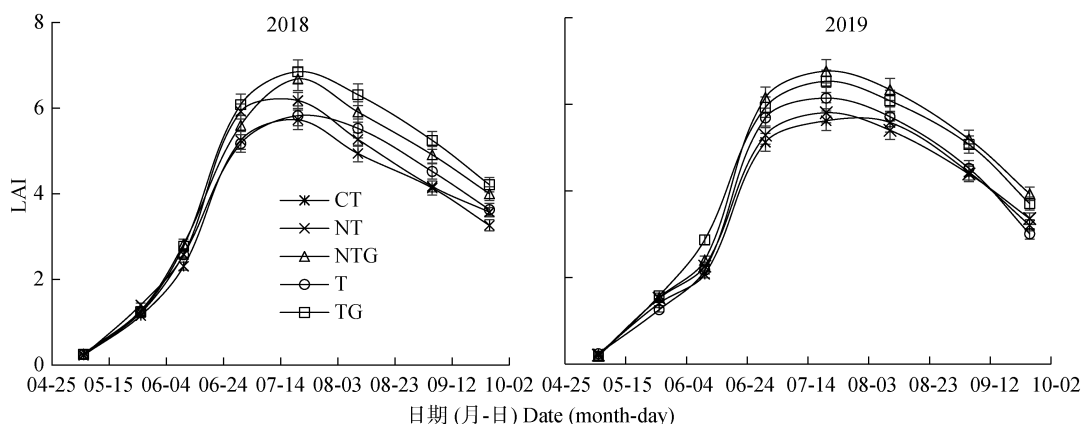


图 4 不同绿肥还田方式下玉米叶面积指数(LAI)的动态变化

Fig. 4 Dynamics of leaf area index (LAI) of maize under different green manure utilization patterns
不同处理的种植方式如表 1 所示。The planting method of each treatment is shown in table 1.

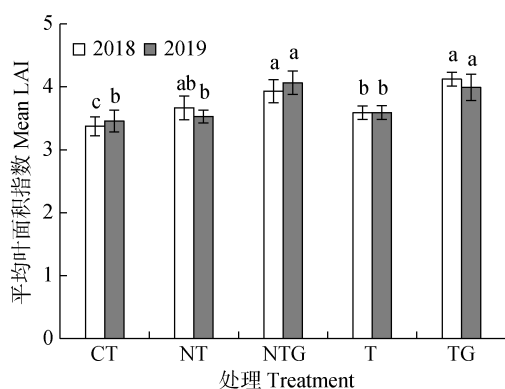


图 5 不同绿肥还田利用方式下玉米平均叶面积指数

Fig. 5 Average leaf area index (MLAI) of maize under different green manure utilization patterns

不同处理的种植方式如表 1 所示。不同小写字母表示同一年份不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。The planting method of each treatment is shown in table 1. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same year at $P < 0.05$ level.

绿肥还田处理提高了玉米播前 0~110 cm 土层土壤贮水量(图 6)。TG 和 NTG 处理下, 玉米播前贮

水量平均分别达 270.7 mm 和 280.7 mm。2018 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米播前土壤贮水量分别较 CT 处理提高 19.6%、22.8%($P < 0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, 分别较 CT 处理提高 9.3%、16.3%($P < 0.05$)。2019 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米播前土壤贮水量分别较 CT 处理显著提高 28.8%、31.0%($P < 0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, 分别较 CT 处理提高 21.1%、19.5%($P < 0.05$)。由此说明, 绿肥地表覆盖免耕可有效降低玉米全生育期耗水量, 且在休闲季具有提高土壤贮水量的作用, 为玉米水分高效利用奠定基础。

2.5 绿肥不同还田利用方式对玉米水分利用效率的影响

麦后复种绿肥不同还田利用方式对玉米水分利用效率影响显著(图 7)。2018 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米水分利用效率分别较 CT 处理高 27.0%、32.7%($P < 0.05$); NTG 较 TG 提高 7.8%($P < 0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, 玉米水分利用

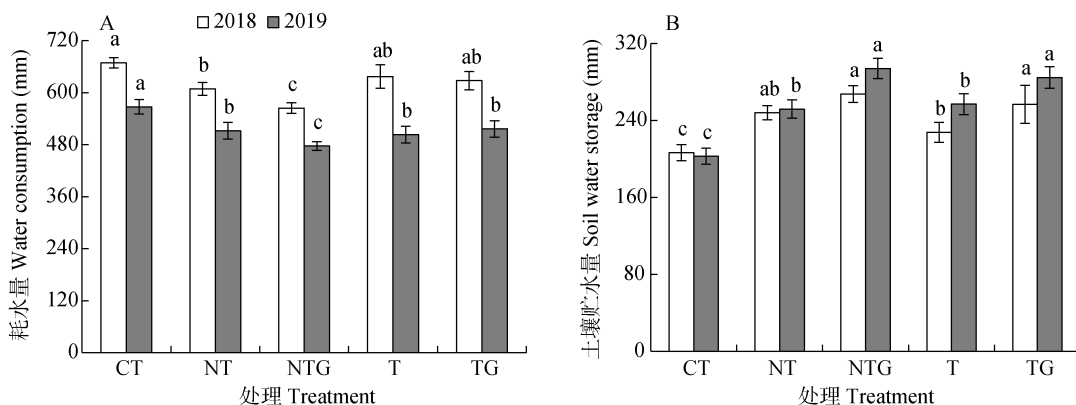


图 6 不同绿肥还田方式下玉米全生育期总耗水量(A)和玉米播前 0~110 cm 土层土壤贮水量(B)

Fig. 6 Total water consumption during the whole growth period of maize (A) and soil water storage of 0~110 cm soil layer before maize sowing (B) under different green manure utilization patterns

不同处理的种植方式如表 1 所示。不同小写字母表示同一年份不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。The planting method of each treatment is shown in table 1. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same year at $P < 0.05$ level.

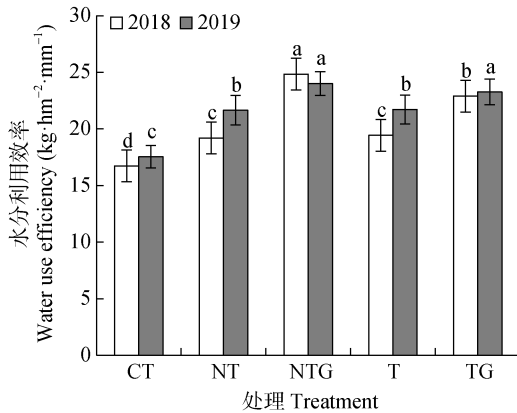


图7 不同绿肥还田利用方式下玉米水分利用效率

Fig. 7 Water use efficiency of maize under different green manure utilization patterns

不同处理的种植方式如表1所示。不同小写字母表示同一年份不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。The planting method of each treatment is shown in table 1. Different lowercase letters represent significant differences among different treatments in the same year at $P < 0.05$ level.

效率分别较 CT 高 14.0%、12.9% ($P < 0.05$)。2019 年绿肥还田处理(TG、NTG)下, 玉米水分利用效率分别较 CT 高 24.6%、27.0% ($P < 0.05$); 绿肥根茬还田处理(T、NT)下, 玉米水分利用效率分别较 CT 高 19.3%、19.0% ($P < 0.05$)。综合两年结果, NTG 水分利用效率最高, 平均达 $24.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, 较 CT 处理提高 29.9%。由此说明, 全量还田条件下, 绿肥地表覆盖免耕是提高玉米水分利用效率的有效还田措施。

3 讨论

3.1 作物产量形成对绿肥还田的响应

作物产量形成由平均叶面积指数、平均净同化率和产量构成因素共同决定^[19]。尤其对于禾本科作物而言, 产量形成的各要素间相互协调补偿是形成高产的基础^[20]。绿肥还田可有效改善土壤养分状况, 促进作物养分吸收, 提高作物干物质积累量和收获指数从而提高作物产量^[21-23]。传统的小麦-玉米轮作体系, 在时间和空间上未能充分有效利用光、热、水以及土地等自然资源。与此不同, 本研究在小麦-玉米两种禾本科作物之间插播绿肥发现, 绿肥还田(全量翻压、地表覆盖)条件下, 后茬玉米籽粒产量平均达 $14\,687.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $14\,274.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于不复种绿肥翻耕处理和根茬还田处理。Kouyaté 等^[24]在半干旱地区的研究表明, 豆科绿肥与谷类作物轮作较谷类作物单作产量提高 37%, 这与本研究结果类似。姚致远等^[14]在豆科绿肥-春玉米-冬小麦的轮作体系中研究表明, 绿肥地表覆盖和全量翻压处理较茎秆移出处理能显著提升玉米产量, 这与本研究

结果相同。Astier 等^[25]在湿润区的研究显示, 绿肥覆盖或翻压还田处理下玉米籽粒产量显著高于无绿肥还田处理, 且翻压还田处理的玉米籽粒产量显著高于覆盖还田处理; 而本研究表明, 覆盖还田和全量翻压还田差异不显著, 这可能是由于区域差异和绿肥品种不同导致的。

本研究发现, 绿肥还田(全量翻压、地表覆盖)条件下, 玉米穗数、穗粒数、百粒重及干物质积累量和平均净同化率均与传统翻耕不复种绿肥差异显著, 且相比绿肥根茬还田处理(翻压、免耕)显著提高玉米成穗数、穗粒数和百粒重。除此之外, 绿肥还田处理(全量翻压、地表覆盖)显著提高玉米生育后期的 LAI, 保证了玉米生育后期光合源的面积, 为玉米高产奠定基础。杨璐等^[21]研究发现, 绿肥翻压较不种植绿肥可显著提高玉米吐丝期之后的干物质积累量, 这与本研究结果相同。周岚等^[26]研究表明, 玉米-大豆(*Glycine max*)轮作较连作显著提高玉米干物质积累量和叶面积指数, 这与本研究结果类似。综上所述, 在小麦玉米两种禾本科作物之间插播绿肥, 绿肥全量翻压或地表覆盖是协调并提高后茬玉米产量形成指标的有效途径。

3.2 作物水分利用特征对绿肥还田的响应

提高作物产量和降低作物耗水量是提高农田水分利用效率的两个主要途径^[17]。绿肥还田有效改善土壤理化性质、促进土壤持水供水能力、优化作物耗水结构而提高水分利用效率^[13,27-28]。本研究发现, 绿肥地表覆盖免耕处理较根茬还田处理和不复种绿肥翻耕处理能有效阻止休闲期土壤水分的散失, 且较其他处理显著降低玉米全生育期耗水量, 为后茬玉米水分高效利用奠定基础, 其水分利用效率较不复种绿肥翻耕平均提高 29.9% ($P < 0.05$), 这与秸秆覆盖还田效果类似^[29-30]。王磊等^[31]研究表明, 绿肥地表覆盖在夏闲期除了满足自身耗水需求, 同时阻止水分的无效消耗, 使大量的降水和冬季灌溉水保蓄在土壤内, 改变土壤蒸发和叶面蒸腾之间的耗水比例关系, 降低主栽作物耗水系数提高水分利用效率, 这与本研究结果相同。在雨养农业区的研究表明, 绿肥自身耗水量较大导致土壤贮水量降低, 但后茬作物产量提升从而提高作物水分利用效率^[32]。而在本研究中绿肥覆盖还田条件下玉米水分利用效率的提高是由玉米产量提高和耗水量降低共同决定的。李靖等^[12]研究表明, 种植绿肥处理的水分利用效率高于休闲处理, 其中绿肥翻压处理下后茬作物耗水量显著高于绿肥地表覆盖处理, 这与本研究的结果

相同。综上说明,对于资源性缺水问题比较严重的内陆干旱灌区,绿肥地表覆盖免耕可解决作物需水和供水矛盾,为作物高效生产提供理论依据。

4 结论

干旱绿洲灌区麦后复种绿肥全量翻压和地表覆盖免耕处理玉米产量分别达 $14\ 687.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $14\ 274.9\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 实现了玉米高产。绿肥全量翻压和地表覆盖免耕较不复种绿肥翻耕显著提高玉米穗数、穗粒数和百粒重,且玉米生育中后期的叶面积指数和干物质累积量明显提高,保证了玉米生育中后期光合源面积和有机物累积,为玉米获得高产提供基础。其中,绿肥地表覆盖免耕处理有效阻止休闲期土壤水分散失且显著降低玉米全生育期耗水量,为后茬玉米水分高效利用奠定基础,其水分利用效率较不复种绿肥翻耕处理提高 29.9%。因此,在干旱绿洲灌区,麦后复种绿肥地表覆盖免耕获得玉米高产的同时,实现了水资源的高效利用。

参考文献 References

- [1] HATFIELD J L, BOOTE K J, KIMBALL B A, et al. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 351–370
- [2] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA-ROBERTS J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616–620
- [3] OLESEN J E, TRNKA M, KERSEBAUM K C, et al. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(2): 96–112
- [4] RAY D K, MUELLER N D, WEST P C, et al. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050[J]. *PLoS One*, 2013, 8(6): e66428
- [5] CHALISE K S, SINGH S, WEGNER B R, et al. Cover crops and returning residue impact on soil organic carbon, bulk density, penetration resistance, water retention, infiltration, and soybean yield[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 111(1): 99–108
- [6] NOVARA A, MINACAPILLI A, SANTORO A, et al. Real cover crops contribution to soil organic carbon sequestration in sloping vineyard[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 300–306
- [7] SALAZAR O, BALBOA L, PERALTA K, et al. Effect of cover crops on leaching of dissolved organic nitrogen and carbon in a maize-cover crop rotation in Mediterranean central Chile[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 399–406
- [8] PANTOJA J L, WOLI K P, SAWYER J E, et al. Corn nitrogen fertilization requirement and corn-soybean productivity with a rye cover crop[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(5): 1482–1495
- [9] VERZEAUX J, ALAHMAD A, HABBIB H, et al. Cover crops prevent the deleterious effect of nitrogen fertilisation on bacterial diversity by maintaining the carbon content of ploughed soil[J]. *Geoderma*, 2016, 281: 49–57
- [10] COUÉDEL A, ALLETO L, TRIBOUILLOIS H, et al. Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254: 50–59
- [11] DANGA B O, OUMA J P, WAKINDIKI I I C, et al. Legume-wheat rotation effects on residual soil moisture, nitrogen and wheat yield in tropical regions[J]. *Advances in Agronomy*, 2009, 101: 315–349
- [12] 李婧, 张达斌, 王峥, 等. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 136–142
- [13] LI J, ZHANG D B, WANG Z, et al. Effect of fertilizer and green manure incorporation methods on the growth and water use efficiency of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 136–142
- [13] 王峥, 梁颖, 姚鹏伟, 等. 绿肥播前施肥和翻压方式对旱地麦田土壤水肥性状的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 119–126
- WANG Z, LIANG Y, YAO P W, et al. Effects of fertilization before sowing of leguminous green manure and its incorporation methods on soil moisture and nutrient regime of wheat field in Weibei Dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(3): 119–126
- [14] 姚致远, 王峥, 李婧, 等. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2329–2336
- YAO Z Y, WANG Z, LI J, et al. Effects of rotations and different green manure utilizations on crop yield and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2329–2336
- [15] 张久东, 包兴国, 曹卫东, 等. 间作绿肥作物对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013, (4): 43–47
- ZHANG J D, BAO X G, CAO W D, et al. Effect of intercropping green manure crops on maize yield and soil fertility[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013, (4): 43–47
- [16] 赵娜, 赵护兵, 鱼昌为, 等. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(12): 41–47
- ZHAO N, ZHAO H B, YU C W, et al. Effect of green manure in summer fallow period and nitrogen rate on winter wheat growth[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, 19(12): 41–47
- [17] 殷文, 柴强, 胡发龙, 等. 干旱内陆灌区不同秸秆还田方式下春小麦田土壤水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(7): 1247–1259
- YIN W, CHAI Q, HU F L, et al. Characteristics of soil water utilization in spring wheat field with different straw retention approaches in dry inland irrigation areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(7): 1247–1259
- [18] 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
- [19] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1074–1083
LI X L, LI C F, HOU Y H, et al. Dynamic characteristics of summer maize yield performance in different planting dates and its effect of ecological factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(6): 1074–1083
- [20] 赵明, 李建国, 张宾, 等. 论作物高产挖潜的补偿机制[J]. 作物学报, 2006, 32(10): 1566–1573
ZHAO M, LI J G, ZHANG B, et al. The compensatory mechanism in exploring crop production potential[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(10): 1566–1573
- [21] 杨璐, 曹卫东, 白金顺, 等. 翻压二月兰对玉米干物质积累和养分吸收及土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(1): 183–189
YANG L, CAO W D, BAI J S, et al. Effects of February orchid application on dry matter accumulation and nutrient uptake in maize and soil nutrient status[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, 29(1): 183–189
- [22] 郭耀东, 程曼, 赵秀峰, 等. 轮作绿肥对盐碱地土壤性质、后作青贮玉米产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 856–864
GUO Y D, CHENG M, ZHAO X F, et al. Effects of green manure rotation on soil properties and yield and quality of silage maize in saline-alkali soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 856–864
- [23] 赵彩衣, 王媛媛, 董青君, 等. 不同水肥处理对苕子和后茬玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 161–166
ZHAO C Y, WANG Y Y, DONG Q J, et al. Influence of different irrigation and fertilization treatments on the growth of *Viciavillosa rothvar* and later-cropping maize and soil fertility[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 161–166
- [24] KOUYATÉ Z, FRANZLUEBBERS K, JUO A S R, et al. Tillage, crop residue, legume rotation, and green manure effects on sorghum and millet yields in the semiarid tropics of Mali[J]. Plant and Soil, 2000, 225(1/2): 141–151
- [25] ASTIER M, MAASS J M, ETCHEVERS-BARRA J D, et al. Short-term green manure and tillage management effects on maize yield and soil quality in an Andisol[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1/2): 153–159
- [26] 周岚, 姜英, 陈阜, 等. 玉米-大豆轮作及氮肥水平对玉米农艺性状及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 61–67
ZHOU L, JIANG Y, CHEN F, et al. Effect of soybean-maize rotation and fertilization on the agronomic trait and grain yield of maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 61–67
- [27] 刘小粉, 刘春增, 潘兹亮, 等. 施用绿肥条件下减施化肥对土壤养分及持水供水能力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (3): 75–79
LIU X F, LIU C Z, PAN C L, et al. Effect of reducing chemical fertilizer when the green manure applied on soil nutrients, water retention and supply capacities[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017, (3): 75–79
- [28] 李富翠, 赵护兵, 王朝辉, 等. 旱地夏闲期秸秆覆盖和种植绿肥对冬小麦水分利用及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 119–125
LI F C, ZHAO H B, WANG C H, et al. Effects of straw mulching and planting green manure on water use and nutrients uptake of winter wheat on dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 119–125
- [29] 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
- [30] 王昕, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分分蓄及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 196–202
WANG X, JIA Z K, HAN Q F, et al. Effects of different straw mulching quantity on soil water and WUE in semiarid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 196–202
- [31] 王磊, 樊廷录, 王勇, 等. 夏闲期栽培模式对土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 55–58
WANG L, FAN T L, WANG Y, et al. Effects of cultivation modes in summer fallow period on soil moisture and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 55–58
- [32] 张达斌, 姚鹏伟, 李婧, 等. 豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2272–2281
ZHANG D B, YAO P W, LI J, et al. Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2272–2281