

少耕留茬小麦间作玉米的耗水特性

武进普, 柴 强

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 2009—2010 年, 通过大田试验, 在不同灌水梯度下, 研究了少耕和秸秆覆盖对小麦间作玉米产量、耗水特性及水分利用效率的影响, 旨在为高效节水间作技术体系的构建提供新思路。研究表明: 间作处理的土地当量比 (*LER*) 为 1.46~1.56, 间作优势明显; 高灌水平与低、中灌水平相比, 少耕留茬间作及传统间作中, 玉米组分经济产量平均提高 44.4% 和 9.31%, 小麦组分经济产量平均提高 10.22% 和 2.36%; 少耕留茬显著提高了小麦间作玉米播种前和收获后 0~120 cm 土层平均贮水量。少耕留茬、间作及灌水量均是影响小麦、玉米耗水量的主导因子, 将少耕留茬集成于间作, 并结合中灌水处理, 为提高小麦、玉米 *WUE* 的最优组合。

关键词: 少耕; 留茬; 灌水量; 经济产量; 耗水量; 水分利用效率

中图分类号: S344.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0122-06

Characteristics of water consumption of wheat/maize intercropping system with reduced tillage and straw mulching

WU Jin-pu, CHAI Qiang

(Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science/Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: During the year of 2009 to 2010, a field experiment was conducted to investigate the effects of reduced tillage and straw mulching on yield, water consumption characteristics and water use efficiency (*WUE*) of wheat/maize intercropping system under different irrigation levels, aiming at providing new ideas for the establishment of efficient water-saving intercropping technical systems. The results showed that the land equivalent ratio (*LER*) of intercropping was between 1.46 and 1.56, and the advantage of intercropping was remarkable. Compared to the low and intermediate irrigation levels, the economic yield of maize under high irrigation level was increased by 44.4% and 9.31% in average, and that of wheat under high irrigation level was increased by 10.22% and 2.36% in average in intercropping with and without reduced tillage and straw mulching. The average soil water storage before sowing and after harvest stages of wheat/maize intercropping system in 0~120 cm profile was significantly improved by reduced tillage and straw mulching. Reduced tillage and straw mulching, intercropping, and irrigation level were all the dominant factors affecting water consumption of wheat and maize. The optimum combination to improve *WUE* of wheat and maize was to adopt the integrated technology of reduced tillage and straw mulching, intercropping, and intermediate irrigation level.

Keywords: reduced tillage; straw mulching; irrigation amount; economic yield; water consumption; water use efficiency

间作是作物多熟种植的重要组成部分, 可提高光、热、水、肥等自然资源的利用率, 具有高产、稳产等多种优点^[1-2], 是干旱地区最具增产潜力的栽培模式之一^[3]。近年来, 随水资源不足对间作制约作用的加剧, 其节水理论和技术研究倍受关注。研究表明, 间作群体绝对耗水量与单作耗水的加权平均差异很小^[4], 其水分利用效率 (*WUE*) 较传统单作高 0.08~0.45 kg·m⁻³^[5-7]。但纵观已有间作研究成果, 大多建立在充分供水前提之下, 限量供水条件下的节水理论和研究十分薄弱, 如何进一步降低间作耗水量是该领域亟待解决的难题。在降低作物群体耗水的各项措施中, 少免耕秸秆覆盖可改变传统栽

收稿日期: 2013-10-14
基金项目: 甘肃省杰出青年基金(1111RJDA006); 国家科技支撑计划(2012BAD14B10); 国家公益性行业(农业)计划课题(201103001)
作者简介: 武进普(1988—), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事作物多熟种植研究。E-mail: wujinpu321@126.com。
通信作者: 柴 强(1972—), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士生导师, 主要从事作物多熟种植、节水农业和循环农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn。

培作物的耗水规律^[8],减少棵间蒸发、增加土壤蓄水量及作物有效耗水量^[9-10],减少总耗水量^[11]。但是,国内外将间作和少免耕秸秆覆盖技术集于同一系统,探讨集成技术的产量和水分利用特征研究鲜见报道,使得该技术潜在应用效益未能发挥出来。

河西走廊光质良好、热量充沛、昼夜温差大,适于发展间作套种。但该区单位耕地配水量小于传统间作需水量,间作应用必须研发新的节水技术。本研究以小麦间作玉米为研究对象,在少耕、小麦高留茬覆盖及不同供水梯度下,量化不同处理措施对间作产量、耗水特性和 *WUE* 的影响,以期为河西走廊高效节水间作技术的建立提供新的思路。

1 材料与方法

本研究于 2009 年 3 月至 2010 年 10 月在甘肃省武威市凉州区永昌镇白云村武威绿洲试验站进行。

表 1 试验处理代码及不同处理作物生育期灌水量												
Table 1 The treatment code and corresponding total irrigation quota during growth period of crops												
处理 Treatments	W ₁	W ₂	W ₃	M ₁	M ₂	M ₃	WM ₁	WM ₂	WM ₃	SWM ₁	SWM ₂	SWM ₃
生育期灌水量/mm Irrigation quota	240	285	330	405	450	495	480	540	600	480	540	600

注:W-单作小麦;M-单作玉米;WM-传统小麦间作玉米;S-留茬;1、2、3 依次表示低、中、高灌水量。

Note: W, M, WM and S mean wheat monoculture, maize monoculture, wheat/maize intercropping and straw mulching, respectively; 1, 2 and 3 mean low, medium and high irrigation quota, respectively.

1.2 供试材料

参试品种为武科 2 号玉米(*Zea mays* L.),小麦为永良 4 号(*Triticum aestivum* Linn.),均由甘肃省农业科学院土壤肥料研究所武威绿洲试验站提供。

1.3 测定指标

产量(*Y*):按小区单收计产。土地当量比(*LER*): $LER = (Y_{ic}/Y_{sc}) + (Y_{iw}/Y_{sw})^{[12]}$ 。式中: Y_{ic} 和 Y_{iw} 分别代表间作玉米和间作小麦产量, Y_{sc} 和 Y_{sw} 分别代表单作玉米和单作小麦产量(下同)。当 $LER > 1$,表明有间作优势, $LER \leq 1$ 无间作优势或表现为间作劣势。

土壤贮水量:作物播种前,测定基础贮水量;作物出苗后每隔 20 d 测定一次,按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~90 cm、90~120 cm 分层测定,作物收获后加测一次。

耗水量(*ET*): $ET = P + I + (S_1 - S_2)$;其中: P 为生育期降水量(mm), I 为作物生长期灌溉量(mm), S_1 为播种前土壤贮水量(mm), S_2 为收获后土壤贮水量(mm)。

水分利用效率(*WUE*): $WUE = Y/ET = Y/[P +$

该区年降雨量 150 mm、蒸发量 2 021 mm、平均气温 7.7℃,日照时数 3 023 h,≥20℃有效积温 3 016℃,麦收后≥20℃有效积温 1 350℃。属于典型的无灌溉便无农业的绿洲农业区,政府核定耕地配水量 6 600 m³·hm⁻²。

1.1 试验设计

试验设种植模式、小麦秸秆留茬和灌水量 3 个参试因子。其中,种植模式为单作小麦、单作玉米、小麦间作玉米;灌水量设低、中、高三个水平(表 1);间作模式设小麦秸秆留茬,茬高 25 cm 和不留茬两种模式。共 12 个处理,每处理重复 3 次,小区随机排列。试验于 2009 年布置,小麦收获时进行留茬处理,作物收获后小麦带免耕,次年灭茬且覆盖地膜播种玉米,玉米带翻耕且次年种植小麦;传统间作为不留茬且全地面翻耕。不同种植模式的田间结构、播种量和施肥制度与当地习惯水平相同。

$I + (S_1 - S_2)]^{[13]}$;其中, Y 为作物产量(kg·hm⁻²)。

$$H_i = \sum_{i=1}^5 \frac{h_i \times \rho_i \times \theta_i \times 10}{100}$$
式中, H_i 为土壤贮水量(mm); h_i 为土壤层厚度(cm); ρ_i 为土壤容重(g·cm⁻³), θ_i 为土壤质量含水量。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理绘图,SPSS19.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同间作模式的土地利用率和作物产量表现

经计算,间作处理的 *LER* 为 1.46~1.56,间作产量优势明显,少耕留茬及灌水水平对 *LER* 影响不显著。与单作相比,间作显著提高了作物经济产量($P_{\text{间作}} = 0.008$)。少耕留茬对间作经济产量影响不显著($P_{\text{少耕留茬}} = 0.285$),间作模式是提高小麦、玉米经济产量的有效途径。与低灌水水平相比,中灌水水平明显提高了间作经济产量,但中、高灌水水平对间作经济产量影响差异不显著。传统间作模式中,混合

经济产量高灌水较低、中水平分别高 32.58%、9.49%;少耕留茬间作中,混合经济产量高灌水较

低、中水平分别提高 31.80%、4.79%(图 1)。

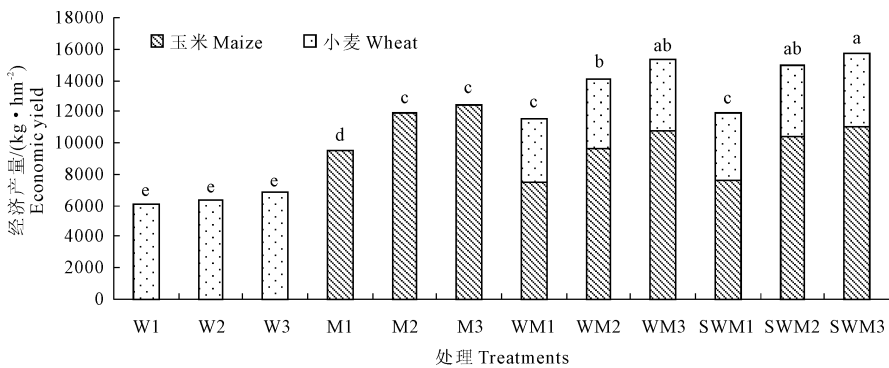


图 1 不同处理小麦及玉米经济产量

Fig.1 The economic yield of wheat and maize under different treatments

间作中与小麦组分产量相比,玉米组分经济产量受不同灌水量影响差异较大。少耕留茬间作中,小麦组分高灌水较低、中水平经济产量分别高 9.35%、1.71%,玉米组分高灌水较低、中水平经济产量分别高 44.52%、6.16%;传统间作模式中,小麦组分高灌水较低、中水平经济产量分别高 11.08%、3.01%,玉米组分高灌水较低、中水平经济产量分别高 44.27%、12.45%;单作小麦高灌水较低、中水平经济产量分别高 14.12%、8.02%,不留茬单作玉米高灌水较低、中水平经济产量分别高 28.22%、21.26%,间作与灌水水平对小麦、玉米经济产量的

交互效应显著($P_{\text{间作} \times \text{灌水梯度}} = 0.035$)。

2.2 少耕留茬覆盖小麦间作玉米全生育期总耗水量

2010 年度轮作玉米播种前 0~120 cm 土层平均贮水量受 2009 年少耕小麦秸秆高留茬覆盖影响显著($P_{\text{少耕留茬}} = 0.005$)。低、中、高相同供水梯度下,2010 年度少耕留茬间作较传统间作播种前 0~120 cm 土层平均贮水量分别高 -8.42%、13.18%、11.68%(表 2)。说明,少耕留茬有助于增加间作中前茬作物对后茬作物播种前 0~120 cm 土层平均贮水量和保蓄冬灌水的作用,但小麦秸秆覆盖并不利于间作低灌水处理 0~120 cm 土层水分累积。

表 2 不同处理播种前、收获后土壤贮水量及全生育期总耗水量

Table 2 Soil water storage at sowing and harvest stage and water consumption in whole growth period of crops

处理 Treatments	播种前土壤贮水量 Soil water storage at sowing stage /mm	生育期降雨量 Rainfall during growth period /mm	收获后土壤贮水量 Soil water storage at harvest stage /mm	耗水量 Water consumption /(mm·hm ⁻²)
W ₁	356.9c	62.9	262.8b	397.0k
W ₂	290.1h	62.9	268.8a	369.2l
W ₃	309.3g	62.9	261.7b	440.5j
M ₁	330.7e	94.7	240.0f	590.4i
M ₂	334.6d	94.7	241.4ef	637.9h
M ₃	394.0a	94.7	254.1c	729.5d
WM ₁	355.6c	98.7	224.4i	709.9f
WM ₂	330.2e	98.7	242.5e	726.4e
WM ₃	335.3d	98.7	232.7h	801.3b
SWM ₁	325.7f	98.7	233.9h	670.5g
SWM ₂	373.7b	98.7	249.3d	763.1c
SWM ₃	374.5b	98.7	237.4g	835.8a

间作模式对小麦、玉米收获后 0~120 cm 土层平均贮水量影响显著($P_{\text{间作}} = 0.001$)。低、中、高同等供水梯度下,单作小麦和单作玉米较少耕留茬间

作收获后 0~120 cm 土层加权平均贮水量分别增 12.36%、7.84%、10.24% 和 2.61%, -3.17%, 7.04%;单作小麦及单作玉米较传统间作收获后 0

~ 120 cm 土层加权平均贮水量分别增 17.10%, 10.86%, 12.44% 和 6.94%, -0.46%, 9.18%, 即间作群体收获后 0~120 cm 土层加权平均贮水量低于单作, 这可能是由于间作模式的高耗水性所致。2009 年留茬处理对 2010 年轮作玉米收获后 0~120 cm 土层平均贮水量影响显著 ($P_{\text{少耕留茬}} = 0.001$)。同等供水梯度下, 少耕留茬间作较传统间作收获后 0~120 cm 土层平均贮水量分别高 4.22%、2.80%、2.00%。这表明, 少耕留茬可有效提高小麦间作玉米收获后 0~120 cm 土层平均贮水量, 且与单作相比, 间作模式不利于小麦、玉米收获后 0~120 cm 土层平均贮水量的累积。小麦、玉米收获后 0~120 cm 土层平均贮水量受灌水量影响显著 ($P_{\text{灌水梯度}} = 0.000$)。不同灌水梯度间相比, 少耕留茬间作中灌水较低、高水平收获后 0~120 cm 土层平均贮水量分别增 6.58%、5.00%; 传统间作高灌水较低、中水平收获后 0~120 cm 土层平均贮水量分别增 8.06%、4.19%; 单作小麦中灌水较低、高水平收获后土层贮水量分别增 2.30%、2.72%; 单作玉米中灌水较低、高水平收获后土层平均贮水量分别增 5.28%、-5.01%。表明, 留茬覆盖间作处理收获后 0~120 cm 土层平均贮水量并不随灌水量的递增而递增。

间作显著增加了小麦、玉米全生育期总耗水量, 且耗水量随灌水梯度的提高而呈明显递增趋势 ($P_{\text{间作}} = 0.000$, $P_{\text{灌水梯度}} = 0.000$) (表 2)。低、中、高同等供水梯度下, 少耕留茬间作较单作小麦和单作玉米加权平均耗水量分别高 68.88%、106.71%、89.74% 和 13.56%、19.64%、14.56%; 传统间作较单作小麦和单作玉米加权平均耗水量分别提高 78.81%、96.76%、81.90% 和 20.24%、13.88%、

9.83%。少耕留茬覆盖对小麦间作玉米全生育期总耗水量影响显著 ($P_{\text{少耕留茬}} = 0.001$)。低、中、高相同供水梯度下, 少耕留茬间作较传统间作全生育期总耗水量依次增 -5.55%、5.06% 和 4.31%。少耕留茬间作高灌水较低、中水平耗水量分别高 24.70%、9.52%; 传统间作高灌水较低、中水平耗水量分别高 12.87%、10.31%; 单作小麦高灌水较低、中水平耗水量分别高 10.95%、19.32%; 单作玉米中, 高灌水较低、中水平耗水量分别高 23.56%、14.37%。间作、少耕留茬及灌水梯度对耗水量的交互效应显著 ($P_{\text{间作} \times \text{少耕留茬} \times \text{灌水梯度}} = 0.000$)。结果说明, 间作、灌水量及少耕留茬皆为影响小麦玉米间作群体耗水特性的主导因子。

2.3 不同处理作物的水分利用效率

间作、灌水水平对小麦、玉米 WUE 影响均为显著, 受少耕留茬处理影响不显著 ($P_{\text{间作}} = 0.002$, $P_{\text{少耕留茬}} = 0.980$, $P_{\text{灌水梯度}} = 0.036$) (图 2)。低、中、高相同供水水平下, 少耕留茬间作较单作小麦和单作玉米 WUE 分别高 16.57%、13.36%、19.84% 和 10.49%、4.99%、10.43%; 传统间作较单作小麦和单作玉米 WUE 分别高 7.01%、11.43%、22.21% 和 1.43%、3.21%、12.62%; 低、中、高不同灌水水平下, 少耕留茬间作中灌水较低、高水平 WUE 分别增加 10.52%、4.52%; 传统间作中灌水较低、高水平 WUE 分别增 18.34%、0.75%; 单作小麦中灌水较低、高水平 WUE 分别增 13.65%、10.49%; 单作玉米中灌水较低、高水平 WUE 分别增 16.31%、9.93%。间作、少耕留茬及灌水量对小麦、玉米 WUE 的交互作用显著 ($P_{\text{间作} \times \text{留茬覆盖} \times \text{灌水梯度}} = 0.002$)。结果说明, 中灌水量结合少耕留茬间作模式在降低耗水量的同时, 可显著提高小麦、玉米间作群体的 WUE 。

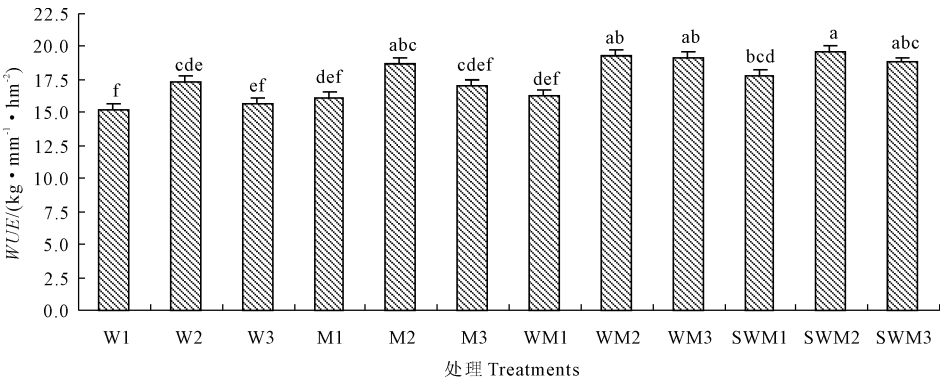


图 2 不同处理作物水分利用效率

Fig.2 Water use efficiency (WUE) of crops under different treatments

3 讨 论

合理的间套作可增产 30% ~ 50%，西北一熟灌区小麦玉米间套带田较一般高产田可增产 50% 以上，部分增产幅度在 100% 以上^[2]。本试验中，间作群体 LER 为 1.46 ~ 1.56，皆大于 1，且间作模式对小麦、玉米经济产量影响显著 ($P_{\text{间作}} = 0.008$)。研究表明，麦田秸秆覆盖具有明显的节水增产效应^[14]，此试验少耕留茬间作与传统间作作物经济产量差异并不显著，这对进一步提高间作产量意义不大。有学者发现，适当增加灌溉定额，玉米产量随灌溉水量增加呈上升趋势，但超过一定值之后，产量并无显著提高^[15]，这与本研究结论一致。本试验中，无论少耕留茬或传统间作，中、高灌水处理对小麦、玉米组分经济产量影响差异不明显，而与低灌水相比，均有显著提高，且间作与灌水水平对小麦、玉米经济产量的交互效应显著 ($P_{\text{间作} \times \text{灌水梯度}} = 0.035$)。此外，高灌水水平与低、中灌水水平相比，少耕留茬间作和传统间作中玉米组分经济产量平均提高 44.4% 和 9.31%；小麦组分经济产量平均提高 10.22% 和 2.36%。这表明，两种间作模式中，高灌水较低、中灌对玉米组分产量提升幅度均明显高于小麦组分，玉米组分产量对不同灌水量的响应更为敏感。这说明优化间作群体需水定额，充分发挥间作玉米组分产量增产潜力，实现小麦间作玉米节水增产是可能的。

保护性耕作可显著提高 0 ~ 200 cm 土层土壤贮水量，免耕覆草较常规耕作土壤贮水量分别提高 0.06% ~ 3.58%^[16]，秸秆覆盖能增强土壤水的入渗能力^[17]，抑制土壤表面蒸发，减少土壤水分无效消耗，增加作物生长前期土壤水分积累^[18]，且玉米的耗水量随着灌溉水量的增加而增加^[15]。此试验中，同等供水梯度下，少耕留茬显著提高了小麦间作玉米播种前和收获后 0 ~ 120 cm 土层平均贮水量，且留茬覆盖间作收获后 0 ~ 120 cm 土层平均贮水量中灌水平处理最高，这说明留茬覆盖间作与传统间作间存在不同耗水机制。少耕留茬及间作显著增加了小麦、玉米全生育期总耗水量，且耗水量随灌水梯度的提高呈明显递增趋势。间作、少耕留茬及灌水梯度三者对耗水量的交互效应极显著 ($P_{\text{间作} \times \text{少耕留茬} \times \text{灌水梯度}} = 0.000$)。这表明，少耕留茬、间作及灌水量皆是影响小麦、玉米耗水特性的主导因子。

Barros^[19]等发现，一定供水条件下，不论留茬覆

盖与否，大豆的 WUE 均随灌水水平的提高而增加，而灌溉定额提高到一定值后，玉米的水分利用效率随着灌溉量的增加而降低。本试验中，少耕留茬对小麦、玉米 WUE 影响无差异 ($P_{\text{少耕留茬}} = 0.499$)，而间作及灌水梯度对小麦间作玉米 WUE 的影响显著。间作中，中、高灌水对小麦、玉米 WUE 影响均无显著差异，而与低灌水水平相比有明显提升，这可能是由于低定额储水灌溉没有造成深层渗漏，蒸发损失减小^[20]，在提高产量的同时灌水量降低幅度较大所致。间作、少耕留茬及灌水量对小麦、玉米 WUE 的交互作用显著 ($P_{\text{间作} \times \text{留茬覆盖} \times \text{灌水梯度}} = 0.002$)。这表明，将少耕留茬集成到间作并结合中灌水量，在降低耗水量的同时提高小麦、玉米间作群体 WUE 是可行的。本试验中采用的灌水定额也可作为相关研究的有效参考。

4 结 论

间作处理的 LER 为 1.46 ~ 1.56，间作产量优势明显。间作中玉米组分产量相比小麦组分产量对不同灌水梯度的响应更为敏感。少耕留茬显著提高了小麦间作玉米播种前与收获后 0 ~ 120 cm 土层平均贮水量，且留茬覆盖间作收获后 0 ~ 120 cm 土层平均贮水量并不随灌水量的递增而递增。间作较单作增大了耗水量，且耗水量随灌水梯度的提高而显著增加，间作、少耕留茬及灌水量皆对小麦、玉米全生育期总耗水量具有显著影响。少耕留茬对间作群体经济产量及 WUE 的影响差异不显著，而对耗水量影响显著。将少耕留茬集成于间作，并结合高效的灌水定额，在降低小麦玉米间作群体耗水量的同时，提高其 WUE 是一项可行的技术措施。

参 考 文 献:

- [1] Li L, Sun J H, Zhang F S, et al. Wheat maize or wheat/soybean strip intercropping yield advantage and interspecific interactions on nutrients [J]. Field crops Research, 2001, 71: 123-137.
- [2] 胡恒觉, 黄高宝. 新型多熟种植 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1999: 1-10.
- [3] 苏德荣. 干旱地区间作种植高效节水灌溉基础问题研究 [D]. 兰州: 中国科学院研究生院, 2001: 134-136.
- [4] Morris B A, Garrity D P. Resources capture and utilization in intercropping: water [J]. Field Crops Research, 1993, 34: 303-317.
- [5] 王仰仁, 杨丽霞. 作物组合种植的需水量研究 [J]. 灌溉排水, 2000, 19(4): 64-67.
- [6] 柴 强. 间套复合群体水分高效利用机理研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(4): 11-15.

[7]

Whitmore A P, J J Schröder. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield A modelling study[J]. Europ. J. Agronomy, 2007,27:81-88.

[8]

朱自玺,赵国强,邓天宏,等.秸秆覆盖麦田水分动态及水分利用效率研究[J].生态农业研究,2000,(1):36-39.

[9]

Sarkar S, Singh S R. Interactive effect of tillage depth and mulch on soil temperature, productivity and water use pattern of rainfed barley (*Hordium vulgare* L.)[J]. Soil & Tillage Research, 2007,92:79-86.

[10]

Sarkar S, Paramanick M, Goswami S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson(*Brassica napus* L. var. glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. Soil & Tillage Research, 2007,93:94-101.

[11]

樊向阳,齐学斌,郎旭东,等.不同覆盖条件下春玉米田耗水特征及提高水分利用率研究[J].干旱地区农业研究,2002,(2):63-67.

[12]

Wiley R W. Intercropping-its importance and research needs: I. Competition and yield advantages[J]. Field Crops Abstr, 1979,32:1-10.

[13]

刘青林,张恩和,王琦,等.灌溉与施氮对留茬免耕春小麦耗水规律、产量和水分利用效率的影响[J].草业学报,2012,21(5):69-77.

[14]

员学锋,吴普特,汪有科,等.免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究[J].农业工程学报,2006,(7):30-34.

[15]

刘玉洁,李援农,潘韬,等.不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2009,(6):73-78.

[16]

郭清毅,黄高宝.保护性耕作对旱地麦-豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):165-167.

[17]

姚宝林.河西内陆河灌区覆盖免耕储水灌溉节水技术初步研究[D].兰州:甘肃农业大学,2005,(2):1-2.

[18]

方文松,朱自玺,刘荣花,等.秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J].干旱地区农业研究,2009,(6):129-134.

[19]

Barros, Lcg, Hanks, Rj. Evapotranspiration and yield of beans as affected by mulch and irrigation[J]. Agronomy Journal,1993,85(3):692-697.

[20]

丁林,金彦兆,李元红,等.石羊河流域农田休闲期耗水规律试验研究[J].中国生态农业学报,2011,(4):65-71.

(上接第 101 页)

[42]

Shrestha N, Raes D, Vanuytrecht E, et al. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling[J]. Agricultural Water Management, 2013,122:53-62.

[43]

Zinyengere N, Mhizha T, Mashonjowa E, et al. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151 (12): 1792-1799.

[44]

Stricevic R, Cosic M, Djurovic N, et al. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower[J]. Agricultural Water Management, 2011,98(10):1615-1621.

[45]

Flores-Gallardo H, Ojeda-Bustamante W, Flores-Magdaleno H, et al. Simulation of corn (*Zea Mays* L.) yield in northern sinaloa using the aquacrop model[J]. Agrobiencia,2013,47(4):347-359.

[46]

Yuan M, Zhang L, Gou F, et al. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia[J]. Agricultural Water Management, 2013,122:28-38.

[47]

Wellens J, Raes D, Traore F, et al. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2013,127:40-47.

[48]

李子忠,徐洋,卢宪菊,等.AquaCrop 模型在大葱生物量和土壤贮水量模拟中的应用和验证[J].中国农业大学学报,2011,16(4):59-66.

[49]

Araya A, Keesstra S D, Stroosnijder L. Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model[J]. Field Crops Research, 2010,116(1/2):196-204.

[50]

Garcia-Vila M, Fereres E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level[J]. European Journal of Agronomy, 2012, 36(1):21-31.

[51]

张铁楠,付驰,李晶,等.基于寒地春小麦 AquaCrop 与 WOFOST 模型适应性验证分析[J].作物杂志, 2013,154(3):121-126.