

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.031

沙区降解膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应与模型研究

李仙岳 丁宗江 闫建文 郭宇 冷旭 王美荣

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探索干旱沙区可降解地膜覆盖下滴灌农田水氮交互效应及优化组合方案,提高其水氮利用效率,在内蒙古乌兰布和沙区进行2年可降解膜覆盖下的滴灌田间试验,设置了低水(2016年165 mm、2017年195 mm)、中水(2016年247.5 mm、2017年292.5 mm)和高水(2016年330 mm、2017年390 mm)3个灌溉定额水平及低氮(140 kg/hm²)、中氮(210 kg/hm²)和高氮(280 kg/hm²)3个施氮量水平,并以普通塑料地膜覆盖的3个水分处理作为对照,采用随机完全组合设计,共计12个处理。研究了可降解地膜覆盖下不同水氮供应对干旱沙区玉米产量及水氮利用效率的影响,建立了可降解地膜覆盖下滴灌农田玉米水氮耦合模型,并对组合方案进行了优化。结果表明:与普通塑料地膜覆盖相比,可降解地膜覆盖下水分利用效率(WUE)明显较低,而在水分充足条件下(高水)玉米产量及其构成因素、氮肥偏生产力(PFPN)无显著差异。可降解地膜覆盖下灌水量和施氮量均对玉米的产量及其构成因素、WUE和PFPN有显著影响。灌水量与施氮量存在明显的交互效应,较低的灌溉定额限制了氮素利用,从低水到中水处理2年玉米PFPN和产量平均增长36.87%和37.18%,而从中水到高水其增长仅为5.93%和6.22%;同样较低的施氮量也限制了水分的利用,从低氮到中氮处理2年玉米WUE和产量平均分别增长了7.99%和18.81%,而从中氮到高氮WUE增长为-3.66%,产量仅增长3.35%,而2年最大产量均出现在高水中氮处理,分别为13875.16、13805.02 kg/hm²。在沙区可降解地膜覆盖下滴灌农田中,灌溉定额、施氮量与玉米产量之间符合二元二次回归模型,该模型预测玉米产量与实际产量呈高度相关(2016、2017年R²分别为0.978、0.988),通过主因素分析水氮增产效应的因素,由大到小依次为:灌水量、施氮量,产量随水氮量的增加均呈先增加后减小的趋势。经模型寻优,得出不同目标产量下的水、氮最佳组合方案,本试验高水中氮处理的水氮配比下的产量在13000~14000 kg/hm²目标范围内,且WUE、PFPN较高,可作为干旱沙区可降解地膜覆盖下较为合理的水肥管理模式和技术参考。

关键词: 干旱沙区; 滴灌施肥; 可降解地膜; 水氮交互效应; 产量; 模型

中图分类号: S275.6; S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0261-10

Interaction Effect and Model of Water and Nitrogen under Degradable Film Mulching in Drip Irrigated Sandy Farmland

LI Xianyue DING Zongjiang YAN Jianwen GUO Yu LENG Xu WANG Meirong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: In order to explore the interaction effect of water and nitrogen, approach optimum management pattern and improve water and nitrogen use efficiencies under the degradable film mulching in arid desert drip irrigated farmland, two years' experiments were conducted under degradable film mulching drip irrigation fields in Wulanbuhe sand areas, Inner Mongolia. There were three irrigation amount levels, including low (165 mm in 2016 and 195 mm in 2017), medium (247.5 mm in 2016 and 292.5 mm in 2017) and high (330 mm in 2016 and 390 mm in 2017), and three nitrogen levels: low nitrogen (140 kg/hm²), medium nitrogen (210 kg/hm²) and high nitrogen (280 kg/hm²) with three irrigation amount treatments under plastic film mulching as control, and the twelve treatments were randomized complete combination design. The effects of different water and nitrogen supplies on maize yield and water and nitrogen use efficiencies under degradable film mulching in arid sandy area were researched, and the coupling model of water and nitrogen about maize in drip irrigated farmland under degradable film

收稿日期: 2018-01-04 修回日期: 2018-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469022、51669020、51539005)、内蒙古自然科学基金项目(2016JQ06)、内蒙古水利科技计划项目和内蒙古科技计划项目

作者简介: 李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究, E-mail: lixianyue80@126.com

mulching was established and optimized. The results showed that the water use efficiency (WUE) under degradable film mulching was significantly lower compared with that under plastic film mulching. However, there was no significant difference in yield, its components and partial productivity of nitrogen (PFPN) under sufficient water conditions. The irrigation and nitrogen amounts would significantly influence the maize yield and the components, WUE and PFPN under degradable film mulching. There were clearly interaction effect among different water and nitrogen treatments, and the lower irrigation amount would restrict nitrogen utilization. The PFPN and maize yield had an average of 36.87% and 37.18% increase in two years' experiment when irrigation amount was changed from low to medium, however, it was just about 5.93% and 6.22% increase when the irrigation amount was changed from medium to high; the lower nitrogen application also would restrict soil water utilization, the WUE and maize yield had an average of 7.99% and 18.81% increase in two years' experiment when nitrogen application was changed from low to medium, however, it was -3.66% for WUE, and just 3.35% for yield when nitrogen application was changed from medium to high; the maximum yield in 2016 and 2017 was 13 875.16 kg/hm² and 13 805.02 kg/hm², respectively, which were all in high irrigation amount and medium nitrogen application treatment. There were good dualistic and quadric regression relationship among irrigation amount, nitrogen application and yield under the degradable film mulching in arid desert drip irrigated farmland, and the determination coefficient R^2 for 2016 and 2017 was 0.978 and 0.988, respectively. The main factor analysis for regression model revealed that the effect of irrigation on yield was greater than that of nitrogen, and the yield was increased first and then decreased with the increase of irrigation and nitrogen. The irrigation and nitrogen application under different target yields was obtained through model optimization. In the experiment, the optimum water and nitrogen ratio was high irrigation amount and medium nitrogen application treatment, and the yield was in target range of 13 000 ~ 14 000 kg/hm² with relatively high WUE and PFPN. Therefore, it can be used as a reasonable technical and theoretical reference for the water and nitrogen management under the degradable film mulching in arid desert drip irrigated farmland.

Key words: arid desert farmland; fertigation; degradable film; interaction effect of water and nitrogen; yield; model

0 引言

合理的田间种植、灌溉、施肥模式与水肥管理是实现作物高产以及水肥资源高效利用的重要途径,同时也是解决农业发展造成环境污染问题的有效措施^[1-3]。干旱区覆膜种植是减少土壤蒸发、提高水分利用效率的关键^[4],然而传统普通塑料地膜由于难以降解导致大量白色污染^[5],影响作物生长,甚至出现覆膜的负效应^[6],生物可降解地膜由于能在自然状态下分解为 CO₂ 和 H₂O,是目前研究的热点^[7]。研究表明,可降解地膜覆盖下在降解诱导期土壤水热与普通塑料地膜覆盖无差异,在降解期土壤水热略低于普通塑料地膜覆盖,作物产量及水分利用效率与普通塑料地膜覆盖差异较小,认为是解决白色污染的重要手段^[8-10]。

膜下滴灌技术是公认的高效节水措施,在干旱区得到跨越式发展,近些年随着膜下滴灌水肥一体化技术的迅速发展,国内外学者对膜下滴灌条件下不同作物的水肥耦合效应进行了大量研究^[11-12]。目前主要集中在不同水肥组合处理对不同作物生长、产量、水肥利用效率以及经济效益等方面的影响研究^[13],如 BADR 等^[14]通过 4 个水氮水平的交互

作用,确定了马铃薯合理的水氮用量。吴立峰等^[15]研究表明,棉花滴灌施肥条件下 60% ET_c 灌水水平会显著抑制籽棉产量并降低净收益,100% ET_c 灌水水平能显著提高籽棉产量和净收益,但水分利用效率低于 60% ET_c 灌水水平。邢英英等^[16]针对膜下滴灌温室番茄水肥耦合效应的研究表明:当追求产量和氮肥利用率时,高水中肥能获得较高的产量和氮肥利用效率以及较低的土壤硝态氮含量;当追求品质和水分利用效率时,低水中肥处理获得最大的维生素 C、可溶性糖和番茄红素含量以及较高的水分利用效率。通过对沙区马铃薯的水肥供应的研究表明,适宜的灌水量和氮、磷、钾施用量不仅能维持马铃薯较好的生长特性,还能获得较高的产量和经济效益^[17],且合理的水肥协同优化组合可以提高水分、养分的利用效率,是实现高产的关键^[18-20]。还有研究表明,水肥耦合作用下灌水量与施氮量的交互作用较显著,水肥耦合影响玉米产量的顺序由大到小为灌水量、施磷量、施氮量^[21]。通过多元多次回归模型进行水肥配施方案寻优,既能确定不同因素的影响程度也能确定水肥调控的最佳组合方案,李楠楠等^[22]通过水氮回归数学模型确定了黑龙江省干旱地区膜下滴灌水肥优化管理方案结果:在固

定钾肥用量 128.2 kg/hm^2 、磷肥用量 130.8 kg/hm^2 时,玉米实际获得最高产量 $12\,333.33 \text{ kg/hm}^2$ 的施氮量为 375 kg/hm^2 、灌溉量为 $538.7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,张忠学等^[23]利用四元二次方程得到了最优玉米光合速率、产量及水分利用效率;何进宇等^[24]采用通用旋转组合设计试验方法,建立了膜下滴灌旱作水稻水肥耦合模型,经模型寻优,得出了不同目标产量下的水、氮、磷最佳组合方案。目前尽管大量学者研究了可降解地膜覆盖下的水分利用效率^[25]、肥料利用效率^[26-27],以及可降解地膜覆盖下滴灌农田的节水增产效应^[28],然而对于可降解地膜覆盖下滴灌农田水肥耦合研究较少,特别是在干旱沙区可降解地膜覆盖下滴灌农田水肥利用效率、水肥交互作用及耦合模型的研究未见报道。故本文主要针对干旱沙区可降解地膜覆盖下滴灌水氮不同组合模式对玉米产量、水氮利用效率进行研究,并且根据不同水氮供应模式基于多元多次回归模型构建沙区可降解地膜覆盖下的水氮耦合模型,并进行方案寻优,提出干旱沙区可降解地膜覆盖下水氮优化供应方案,以期可为可降解地膜的推广以及干旱沙区水氮高效利用奠定理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2016年和2017年2年试验在内蒙古自治区河套灌区乌兰布和沙区木雷滩试验站(东经 $106^{\circ}9' \sim 107^{\circ}10'$,北纬 $40^{\circ}9' \sim 40^{\circ}57'$)进行。该试验区属中温带干旱气候,干旱少雨,昼夜温差大,风势强烈,光热资源丰富,无霜期年平均 168 d ,全年日照时长达 $3\,181 \text{ h}$,6—8月大于 15°C 积温 $2\,200^{\circ}\text{C}$ 以上,年平均降雨量为 102.9 mm ,年平均蒸发量为 $2\,258.8 \text{ mm}$ 。其中2016年和2017年生育期降雨量分别为 141.5 、 36.6 mm ,参考作物蒸发蒸腾量 (ET_0) 分别为 653.19 、 744.55 mm (图1)。2年试验在同一地块进行,试验田土壤均匀、质地为砂土,0~100 cm 平均田间持水率为 14.03% (质量含水率),平均土壤容重为 1.55 g/cm^3 。耕作层(0~60 cm)土壤总氮、有机质、速效氮、速效钾和速效磷质量比分别为 0.32 g/kg 、 2.61 g/kg 、 18.18 mg/kg 、 76.9 mg/kg 、 5.07 mg/kg 。由于该地区多年采用地下水滴灌,2016、2017年生育期地下水埋深为 $6 \sim 8 \text{ m}$ 。

1.2 试验材料

供试作物为当地大面积种植的玉米(先锋32D22)。选用磴口县大众塑料厂生产的普通聚乙烯塑料地膜(厚度为 0.008 mm 、宽度为 70 cm)和山东省山东天壮环保有限公司生产可降解地膜(厚度

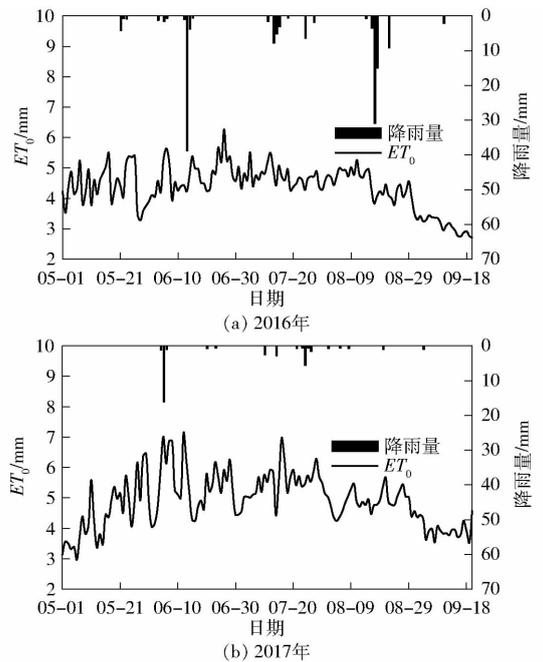


图1 2016年和2017年全生育期 ET_0 和降雨量

Fig. 1 ET_0 and precipitation for growth period in 2016 and 2017

为 0.008 mm 、宽度为 80 cm)作为供试地膜,选用河南晋开化工投资控股集团有限公司生产的尿素硝酸铵溶液液体肥(含 $\text{N} 32\%$)作为追肥肥料。滴灌带滴头设计流量为 2.4 L/h ,滴头间距为 30 cm 。施肥采用压差式施肥罐施肥,灌水量通过水表控制,每个小区有独立的施肥罐和水表。

1.3 试验设计

以可降解膜覆盖下滴灌灌水量和施氮量为2个变量因子进行随机完全组合设计。灌水量分别为:W1(低水)、W2(中水)、W3(高水)3个水平;施氮量分别为:F1(低氮)、F2(中氮)、F3(高氮)3个水平。同时设置高氮(F3)条件下普通塑料地膜(P)覆盖的W1(低水)、W2(中水)、W3(高水)3个灌水量水平作为可降解地膜的对照处理,试验共12个处理。每个处理重复3次,共36个小区,进行随机田间区组排列,小区长 20 m ,宽 4.5 m ,面积为 90 m^2 。试验种植方式为“一带一膜两行”,种植密度 $55\,556 \text{ 株/hm}^2$ 。试验各因素田间施用量,以及经归一化处理后的编码值见表1。

2年试验分别在2016、2017年5月1日播种,于当年9月20日收获,生育期时长 143 d 。所有处理灌水日期和灌水次数均相同,2016、2017年分别灌水11次和13次。基肥为尿素(含 $\text{N}:46\%$)、磷酸二铵(含 $\text{P}_2\text{O}_5:46\%$)、硫酸钾(含 $\text{K}_2\text{O}:50\%$),追肥为尿素硝酸铵溶液液体肥(含 $\text{N}:32\%$)。磷肥和钾肥各处理施用量相同,均为 120 kg/hm^2 ,全部作为基肥施入。氮肥分4次在不同生育期施入,分别为基肥

表1 试验因素编码与试验设计

Tab.1 Design of test factors and levels

处理 编号	因素编码值		2016年		2017年	
	灌水量	施氮量	灌水量/ mm	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	灌水量/ mm	施氮量/ (kg·hm ⁻²)
	x_1	x_2				
W1F1	-1	-1	165.0	140	195.0	140
W1F2	-1	0	165.0	210	195.0	210
W1F3	-1	1	165.0	280	195.0	280
W2F1	0	-1	247.5	140	292.5	140
W2F2	0	0	247.5	210	292.5	210
W2F3	0	1	247.5	280	292.5	280
W3F1	1	-1	330.0	140	390.0	140
W3F2	1	0	330.0	210	390.0	210
W3F3	1	1	330.0	280	390.0	280

20%、拔节期30%、抽雄期30%、灌浆期20%。滴灌施肥采用既可高效利用肥料又可避免滴头堵塞的模式,即前1/4时间灌清水,中间1/2时间打开施肥罐施肥,后1/4时间再灌清水冲洗。

1.4 测定项目与方法

(1) 基本指标的测定

气象数据测定:在试验站内设置自动气象站(HOBO-U30型),每小时自动记录降水量、太阳辐射、空气温度、空气湿度、风速等。

地上部分干物质量的测定:在每个生育期将所取玉米植株从茎基部与地下部分分离,去掉表面的尘土,称其鲜质量,而后放入干燥箱中在105℃条件下杀青1h,75℃恒温干燥至恒质量,放入干燥器中冷却,用电子天平称量。每小区取3株玉米进行测定,求平均值。

产量的测定:成熟期在各个小区随机取样,每个小区取5个点,每个点分别取连续5株玉米,测其单株穗长、穗粗、穗质量,并将玉米穗脱粒,风干籽粒称百粒质量与总粒质量,并折算成每公顷产量。

土壤水分的测定:每隔10d测一次,灌溉、降雨前后加测,在每个小区取2个测点,每个测点在膜下和膜间取土,取样深度为0~10cm、10~20cm、20~40cm、40~60cm、60~80cm、80~100cm。

(2) 相关指标计算方法

耗水量(ET)的计算:采用水量平衡法计算不同时段内的耗水量,并进行累加,公式为

$$ET = P + I + \Delta W_s - Q \quad (1)$$

式中 ET ——作物全生育期内总耗水量,mm

P ——有效降雨量,mm

I ——有效灌溉量,mm

ΔW_s ——土壤贮水量,mm

Q ——地下水的补给量和渗漏量,mm

由于灌溉方式为滴灌且该区域地下水位较深

(6~8m),故忽略地下水补给量和渗漏量。

水分利用效率(WUE)为

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中 Y ——玉米产量,kg/hm²

氮肥偏生产力(PFPN)是指单位投入氮所能生产的作物的产量,其计算公式为

$$P_{FPN} = Y/F \quad (3)$$

式中 F ——氮肥投入量,kg/hm²

(3) 水氮耦合模型

本试验研究膜下滴灌灌水量、氮肥用量与玉米产量之间的回归关系,以玉米产量为目标,以灌水量与施氮量为自变量,建立产量回归模型,用二元二次回归方程进行模型的表达。二元二次回归方程表达式为

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 \quad (4)$$

式中 y ——玉米预测产量,kg/hm²

a_0 ——回归模型的常数项

a_1, a_2 ——回归模型的一次项系数

a_{12} ——回归模型的交互项系数

a_{11}, a_{22} ——回归模型的二次项系数

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2013软件进行数据处理,SPSS 22.0软件进行回归模型建立和统计分析,Origin 9.0软件进行绘图。

2 结果分析

2.1 可降解地膜覆盖下滴灌农田水氮互作对玉米产量及其构成因素的影响

合理的水氮供应是形成高产及水氮高效利用的基础,2016年和2017年水氮交互作用对玉米产量及其构成因素的试验结果(表2)有相似的规律,方差分析结果显示,灌水量和施氮量对玉米产量及其构成因素都有极显著的影响,对于干旱沙区由于气候干燥严重缺水,灌水量是影响作物产量的首要因素,其次施氮高低也显著影响玉米产量,水氮交互作用对玉米产量仍呈显著差异。

由表2可知,在相同施氮量处理下随着灌水量增加产量呈增加趋势,相同灌水量平均后显示从低水到中水2016年和2017年玉米产量平均增长32.02%和42.91%,2年平均为37.18%,而从中水到高水则分别为5.86%和6.59%,2年平均为6.22%,可见尽管灌水量高的处理产量也较高,但随着灌水量的增加,灌水量对玉米的增产效应明显减小。沙区施氮量对玉米产量影响也十分明显,从低氮到中氮2016年和2017年玉米产量分别增长

表 2 水氮互作对玉米产量及其构成因素的影响

Tab. 2 Effects of nitrogen and irrigation on maize yield and its components

处理	2016 年				2017 年				
	产量/ (kg·hm ⁻²)	干物质质量/ (g·株 ⁻¹)	百粒质量/ g	穗粒数/ 个	产量/ (kg·hm ⁻²)	干物质质量/ (g·株 ⁻¹)	百粒质量/ g	穗粒数/ 个	
F1	W1	8 428.19 ^e	382.44 ^h	31.79 ^e	548 ^h	7 413.83 ^e	375.42 ^h	28.59 ^f	536 ^h
	W2	11 165.31 ^{bc}	411.34 ^{ef}	35.67 ^e	647 ^{de}	10 313.91 ^{bc}	396.44 ^{fg}	32.95 ^{cd}	647 ^e
	W3	11 501.68 ^{bc}	417.33 ^e	35.75 ^e	665 ^d	10 665.19 ^b	405.11 ^e	33.15 ^{cd}	665 ^{cd}
F2	W1	9 376.50 ^{de}	397.12 ^g	33.13 ^d	585 ^g	8 667.09 ^d	390.22 ^g	31.54 ^e	568 ^g
	W2	12 352.16 ^{ab}	451.45 ^d	37.11 ^b	688 ^c	12 485.89 ^a	441.33 ^d	35.12 ^b	676 ^c
	W3	13 875.16 ^a	498.35 ^a	39.02 ^a	735 ^a	13 805.02 ^a	485.73 ^a	38.77 ^a	736 ^a
F3	W1	10 096.89 ^d	405.93 ^g	33.88 ^d	616 ^f	9 053.79 ^d	395.44 ^g	32.21 ^{de}	581 ^g
	W2	13 317.35 ^a	474.62 ^c	38.77 ^a	710 ^b	13 119.71 ^a	461.31 ^c	35.89 ^b	698 ^b
	W3	13 614.97 ^a	486.14 ^{bc}	38.87 ^a	724 ^{ab}	13 726.68 ^a	481.41 ^{ab}	38.55 ^a	736 ^a
PF3	W1	11 022.74 ^{bc}	410.35 ^{ef}	35.88 ^e	635 ^{ef}	9 901.15 ^{bc}	402.10 ^{ef}	33.55 ^e	610 ^f
	W2	13 436.78 ^a	478.95 ^{bc}	38.79 ^a	716 ^{ab}	13 344.01 ^a	470.93 ^{bc}	36.14 ^b	706 ^b
	W3	13 759.58 ^a	488.52 ^{ab}	38.96 ^a	730 ^a	13 814.71 ^a	485.62 ^a	38.85 ^a	735 ^a
显著性 检验 (<i>F</i>)	灌水水平	282.09 ^{**}	71.50 ^{**}	159.67 ^{**}	289.64 ^{**}	153.86 ^{**}	69.87 ^{**}	232.94 ^{**}	417.90 ^{**}
	施肥水平	78.29 ^{**}	41.57 ^{**}	45.59 ^{**}	73.82 ^{**}	52.85 ^{**}	46.69 ^{**}	119.59 ^{**}	58.82 ^{**}
	灌水×施肥	4.39 [*]	5.94 ^{**}	2.96 [*]	3.09 [*]	2.98 [*]	6.44 ^{**}	7.13 ^{**}	3.25 [*]

注:同列数值后不同字母表示差异显著,*表示差异显著($P < 0.05$),**表示差异极显著($P < 0.01$),下同。

14.50%和23.12%,平均为18.81%,从中氮到高氮分别为4.00%和2.70%,平均为3.35%。但是水氮交互作用后最高产量并不是出现在高水高氮处理中,2年试验显示高水中氮(W3F2)处理产量均为最大,分别为13 875.16、13 805.02 kg/hm²;说明在高水情况下,施氮量不足与过量施氮都会抑制玉米的生长。产量最小的水氮组合均为低水低氮(W1F1)处理,分别为8 428.19、7 413.83 kg/hm²。玉米百粒质量、干物质质量和穗粒数与产量变化趋势基本一致,最大值均处在水氮的中高水平。

在施肥量和灌水水平相同的情况下,可降解地膜和普通地膜覆盖下产量及其构成因素非常接近,其中普通地膜覆盖下的产量略高于降解地膜,基本无显著差异,这和申丽霞等^[29]的研究基本一致,但是在干旱沙区低水处理本身严重限制玉米生长,而可降解地膜在玉米生长后期由于地膜降解蒸发量加大,缺水进一步加大,从而导致低水处理普通地膜覆盖下产量明显高于可降解地膜覆盖下玉米产量,低水处理可降解地膜覆盖2年比普通地膜覆盖玉米产量平均降低8.47%,而中水、高水平均仅降低1.28%和0.84%,无显著差异。可见,在干旱沙区中水和高水处理下可降解地膜覆盖下不同施氮量对产量无显著差异,而低水处理下不同施氮量对玉米产量呈显著差异,且普通地膜和降解地膜覆盖产量也呈显著差异,说明在水分充足条件下,可降解地膜覆盖对玉米的生长与产量影响不显著,并且降低施氮量玉米的产量也

不会显著降低。

2.2 可降解地膜覆盖下滴灌农田水氮互作对玉米水分利用效率与氮肥偏生产力的影响

由于可降解地膜在作物生长后期地膜的降解和破损远大于普通塑料地膜,从而增加了土壤的蒸发量,降低了水分利用效率^[30]。由图2a和图2b可知,在相同施肥量条件下覆盖普通地膜处理的耗水量均低于对应的可降解地膜,覆盖普通地膜的W1、W2、W3处理2年平均耗水量低10.75%、9.13%和9.39%;而水分利用效率(WUE),2年平均提高了21.87%、10.51%和10.41%。对于可降解地膜覆盖农田不同水氮互作处理农田,在相同灌水水平下,随施氮量的增加耗水量也增加,水分利用效率随施氮量的增加呈抛物线趋势,从低氮到中氮处理2年WUE平均增长7.99%,而从低氮到高氮WUE平均增长-3.66%。2016年和2017年最大WUE均出现在中肥(F2)处理;在相同施氮水平下,耗水量由大到小顺序依次为W3、W2、W1,中水(W2)处理WUE均高于低水(W1)和高水(W3)处理。可见只有适宜的水氮处理才能提高水分利用效率。2016年和2017年试验的中水中氮(W2F2)处理的WUE分别为3.34、3.01 kg/m³,在所有处理中均最高。而高水中氮(W3F2)处理的产量最高(表2),其2016年和2017年的WUE分别为3.31、2.97 kg/m³。可见对于干旱沙区可降解地膜覆盖下的滴灌农田中,高水中氮(W3F2)处理玉米产量和WUE均较高。

对2016年和2017年氮肥偏生产力(PFPN)方

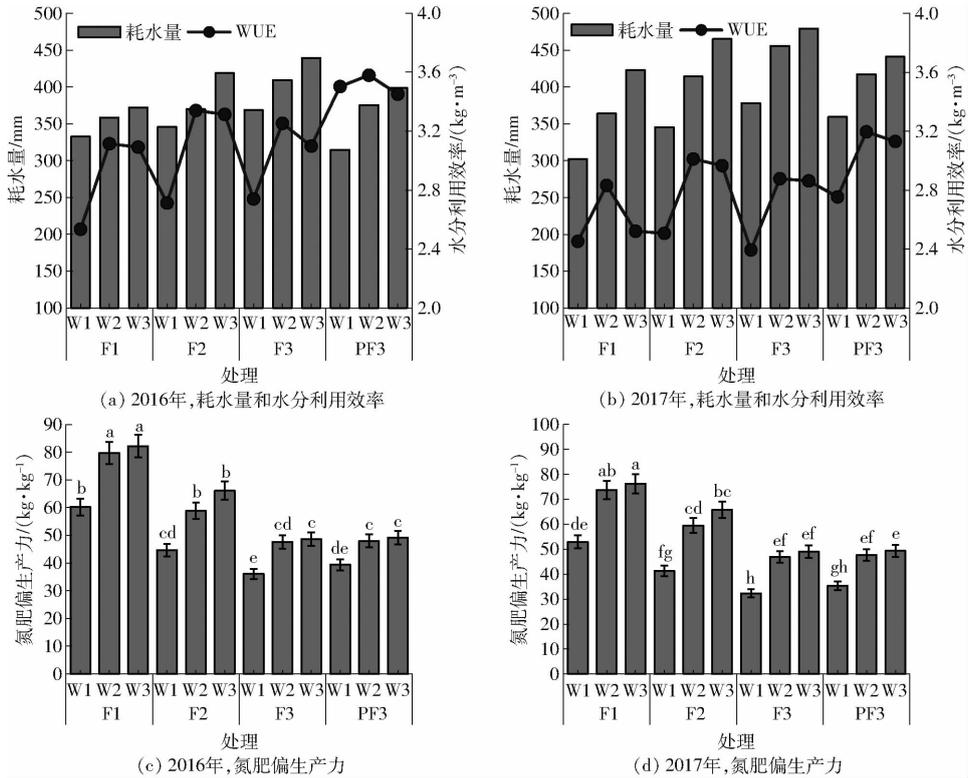


图2 水氮互作对玉米水分利用效率与氮肥偏生产力的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen and irrigation on water and nitrogen utilization

差分析可以看出(图2c和图2d),可降解地膜和普通塑料地膜覆盖下的PF3N差异并不显著,说明可降解地膜对氮肥偏生产力的影响较小。通过对比分析2年覆盖可降解地膜条件下不同水氮处理的PF3N可知,2016年和2017年PF3N最大均为高水低氮(W3F1)处理,分别为82.15、76.18 kg/kg;低水高氮(W1F3)处理的PF3N最小,分别为36.06、32.33 kg/kg。当灌水量相同时,PF3N与施氮量呈显著的负相关,不同施氮处理间2年均存在显著差异。当施氮量相同时,PF3N与灌水量呈正相关,其中W1的PF3N显著低于W3与W2,且从低水到中水处理2年PF3N平均增长36.87%,而从中水到高水处理PF3N仅平均增长35.93%。说明玉米在满足对水分的需求后,氮肥偏生产力会明显提高。2年最高产量水平的高水中氮(W3F2)处理的PF3N分别为66.07、65.74 kg/kg,均仅次于高水低氮(W3F1)处理与中水低氮(W2F1)处理。

2.3 可降解地膜覆盖下水氮耦合模型与方案优化

2.3.1 水氮耦合模型方程建立

利用2年的覆盖可降解地膜水肥耦合玉米产量数据分别进行二元二次回归模拟,得到2016年和2017年不同降雨水平年产量(y)与灌水量编码值(x_1)、施氮量编码值(x_2)的回归模型为

$$y = 12\,620.86 + 1\,848.37x_1 + 989x_2 + 111.15x_1x_2 - 1\,129.37x_1^2 - 513.88x_2^2 \quad (5)$$

$$y = 12\,597.94 + 2\,177.03x_1 + 1\,251.21x_2 + 355.38x_1x_2 - 1\,417.9x_1^2 - 937.15x_2^2 \quad (6)$$

对式(5)和式(6)进行显著性检验,决定系数分别为 $R_1^2 = 0.978$ 、 $R_2^2 = 0.988$,表明预测产量与实测产量有很好的拟合度。经检验 $F_1 = 26.51$ 、 $P_1 = 0.010$; $F_2 = 47.42$ 、 $P_2 = 0.005$,说明回归关系2年都达到了极显著水平。

2.3.2 主因素效应分析

试验所建立方程中两因素编码都为无量纲线性编码,且各一次项、平方项、交互项的回归系数间不相关,偏回归系数已标准化。因此模型中回归系数绝对值的大小可直接反映各因素对产量的影响程度。分析2年的回归模型方程(5)、(6)可知,在一定范围内,两因素都有增产效应,且影响顺序为灌水量(x_1)大于施氮量(x_2),说明在沙土地区可降解地膜覆盖条件下灌水的作用大于施氮。

2.3.3 单因素效应分析

为了进一步讨论单个因素的单独作用对产量的效应,现对回归方程(5)、(6)进行降维处理,将两个因素中的一个设为零水平,可得灌水量(y_w)与施氮量(y_f)的单因素效应函数为

$$2016年 \quad y_w = 12\,620.86 + 1\,848.37x_1 - 1\,129.37x_1^2 \quad (7)$$

$$y_f = 12\,620.86 + 989x_2 - 513.88x_2^2 \quad (8)$$

$$2017 \text{ 年 } y_w = 12\,597.94 + 2\,177.03x_1 - 1\,417.9x_1^2 \quad (9)$$

$$y_F = 12\,597.94 + 1\,251.21x_2 - 937.15x_2^2 \quad (10)$$

各因素对产量的效应如图 3 所示。由图 3 可知,其中一个因素为零水平时,2016 年和 2017 年的玉米产量随灌水量和施氮量的变化曲线均为开口向下的抛物线,水氮单因素对产量的效应均为正效应,但随水氮量的增加,产量增加越来越缓慢,符合报酬递减效应,存在产量最大值点,水氮两因素相比较,水对产量的增产效应更显著。2016 年,当 $x_1 = 0.818$ 时,对应灌水量为 314.99 mm,玉米产量达到最大值,为 13 377.14 kg/hm²。当 x_1 小于 0.818 时,玉米产量随灌水量的增加而增加,当 x_1 大于 0.818 时,玉米产量随灌水量增加而降低。当 x_2 等于 0.962 时,对应施氮量为 277.34 kg/hm²,玉米产量

达到最大值,为 13 096.71 kg/hm²。当 x_2 小于 0.962 时,玉米产量随施氮量的增加而增加,当 x_2 大于 0.962 时,玉米产量随施氮量增加而降低。2017 年,当 x_1 等于 0.767 时,对应灌水量为 367.28 mm,玉米产量达到最大值,为 13 433.59 kg/hm²。当 x_1 小于 0.767 时,玉米产量随灌水量的增加而增加,当 x_1 大于 0.767 时,玉米产量随灌水量增加而降低。当 x_2 等于 0.668 时,对应施氮量为 256.76 kg/hm²,玉米产量达到最大值,为 13 015.57 kg/hm²。当 x_2 小于 0.668 时,玉米产量随施氮量的增加而增加,当 x_2 大于 0.668 时,玉米产量随施氮量增加而降低。由 2016 年和 2017 年的水氮两因素变化曲线规律说明,在一定范围内灌水量与施氮量的增加有利于提高玉米的产量,而过量灌水施氮与过少灌水施氮都会抑制玉米的生长。

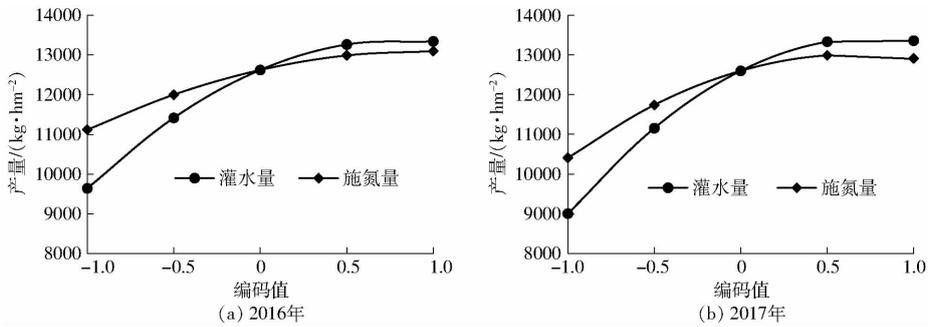


图 3 单因素对产量影响的效应曲线

Fig. 3 Effect curves of single factor on yield

2.3.4 单因素边际效应分析

边际产量可反映各因素的最适投入量和单位水平投入量变化对产量增加或减少速率的影响,各因素在不同水平时的边际产量可通过对回归子模型(7)~(10)求一阶偏导求出,得到施氮量、灌水量的边际效应方程为

$$2016 \text{ 年 } dy_w/dx_1 = 1\,848.37 - 2\,258.74x_1 \quad (11)$$

$$dy_F/dx_2 = 989 - 1\,027.76x_2 \quad (12)$$

$$2017 \text{ 年 } dy_w/dx_1 = 2\,177.03 - 2\,835.8x_1 \quad (13)$$

$$dy_F/dx_2 = 1\,251.21 - 1\,874.3x_2 \quad (14)$$

根据两因素边际函数绘制出对应的边际效应图

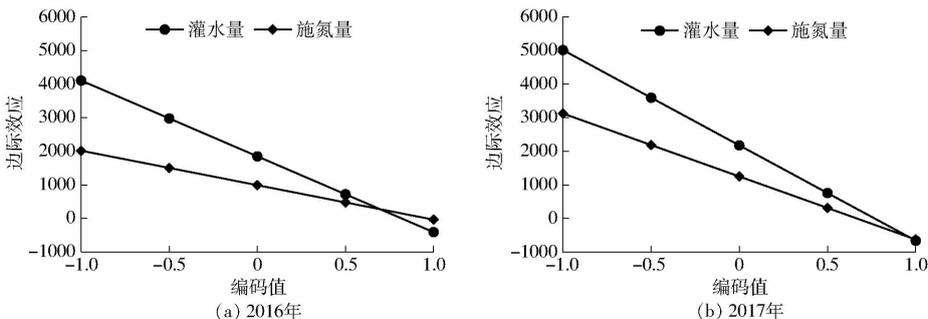


图 4 产量边际效应分析

Fig. 4 Analysis of marginal effect of yield

(图 4)。可以看出,随着灌水量和施氮量的增加,边际玉米产量效应均呈现递减趋势,直到出现负增长。图 4 纵坐标大于零表示因素可促进玉米生长,小于零表示会抑制玉米的生长。2016 年,当 x_1 小于 0.818 时,灌水会促进玉米生长,当 x_1 大于 0.818 时,灌水会抑制玉米生长。当 x_2 小于 0.962 时,施氮会促进玉米生长,当 x_2 大于 0.962 时,施氮会抑制玉米生长。2017 年,当 x_1 小于 0.767 时,灌水会促进玉米生长,当 x_1 大于 0.767 时,灌水会抑制玉米生长。当 x_2 小于 0.668 时,施氮会促进玉米生长,当 x_2 大于 0.668 时,施氮会抑制玉米生长。

2.3.5 两因素交互作用分析

玉米的产量是受水氮两因素共同作用影响的,它们之间存在着相互促进或相互抑制的关系。图5是灌水量和施氮量对玉米产量的互作效应三维关系。可以看出,当灌水量一定时,玉米的产量随施氮量的增加呈先上升后下降的趋势;同样,当施氮量一定时,玉米的产量随灌水量的增加呈先上升后下降的

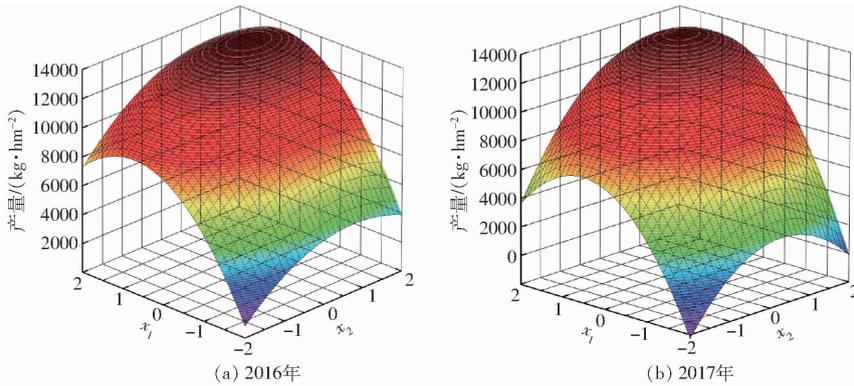


图5 水氮对玉米产量的互作效应

Fig. 5 Effects of nitrogen and irrigation on maize yield

2.3.6 组合方案优化

为得出2年覆盖可降解地膜条件下,玉米不同目标产量的最优水氮组合方案,采用频数法对式(5)、(6)进一步分析,在-1~1之间等距取5个水平(-1、-0.5、0、0.5、1)。通过模拟求得,在所得25套组合方案中,玉米产量在11 000~12 000 kg/hm²的方案有7套,产量在12 000~13 000 kg/hm²的方案有7套,产量在13 000~14 000 kg/hm²的方案有7套。其优化组合方案见表3,寻优过程中均值、标准差和95%置信区间的计算公式从略。由表3可知,在干旱沙区可降解地膜覆盖滴灌条件下得到2年不同降雨量情况下不同目标产量的水氮组合方案:①当玉

米产量在11 000~12 000 kg/hm²区间时,2016年灌水量201.19~293.80 mm,施氮量134.94~245.06 kg/hm²;2017年灌水量233.77~278.10 mm,施氮量186.41~268.59 kg/hm²。②当玉米产量在12 000~13 000 kg/hm²区间时,2016年灌水量242.52~314.35 mm,施氮量170.78~231.72 kg/hm²;2017年灌水量280.80~362.70 mm,施氮量174.14~259.86 kg/hm²。③当玉米产量在13 000~14 000 kg/hm²区间时,2016年灌水量247.23~338.07 mm,施氮量208.10~287.90 kg/hm²;2017年灌水量290.03~397.31 mm,施氮量207.85~282.15 kg/hm²。

表3 目标产量寻优方案

Tab. 3 Schemes for optimizing maize target yields

目标产量/ (kg·hm ⁻²)	2016年		2017年	
	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)	灌水量/mm	施氮量/(kg·hm ⁻²)
11 000 ~ 12 000	201.19 ~ 293.80	134.94 ~ 245.06	233.77 ~ 278.10	186.41 ~ 268.59
12 000 ~ 13 000	242.52 ~ 314.35	170.78 ~ 231.72	280.80 ~ 362.70	174.14 ~ 259.86
13 000 ~ 14 000	247.23 ~ 338.07	208.10 ~ 287.90	290.03 ~ 397.31	207.85 ~ 282.15

3 结论

(1)与普通塑料地膜覆盖相比,在干旱沙区可降解地膜覆盖下低水(W1)、中水(W2)和高水(W3)2年WUE平均分别降低21.87%、10.51%和10.41%。而在水分充足条件下(高水)玉米产量、产量构成因素和氮肥偏生产力(PFPN)无显著差异。低水处理下可降解地膜覆盖比普通塑料地膜覆盖玉

米产量平均降低8.47%,而中水、高水平平均仅降低1.28%和0.84%,无显著差异。

(2)干旱沙区可降解膜覆盖下灌水量、施氮量及水氮耦合效应均对玉米的产量及其构成因素、WUE和PFPN有显著影响,影响程度由大到小为灌水量、施氮量、水氮耦合。不同水氮处理之间存在明显的交互效应,较低土壤水分会限制产量和PFPN,且较低的土壤氮含量会限制产量和WUE。随着灌

水量增加产量和 PFPN 均呈增加趋势,从低水到中水处理 2016 年和 2017 年玉米产量平均增长 32.02% 和 42.91%,但从中水到高水处理则仅为 5.86% 和 6.59%;WUE 呈先增大后降低的趋势,中水处理 WUE 均高于低水和高水处理。从低氮到中氮处理 2016 年和 2017 年玉米产量分别增长 14.50% 和 23.12%,但从中氮到高氮处理仅为 4.00% 和 2.70%;WUE 随施氮量增加呈抛物线趋势。2 年最大产量均出现在高水中氮(W3F2)处理,分别为 13 875.16、13 805.02 kg/hm²。

(3)以产量为目标建立了水氮二元二次回归模型方程,得出水氮均对玉米有显著的增产作用,作用由大到小为灌水量、施氮量,且水氮之间具有明显的交互作用。在干旱沙区可降解地膜覆盖滴灌条件下得到 2 年降雨量不同情况下较高目标产量的最优水

氮组合方案:当玉米产量在 13 000 ~ 14 000 kg/hm² 区间时,2016 年灌水量 247.23 ~ 338.07 mm,施氮量 208.10 ~ 287.90 kg/hm²;2017 年灌水量 290.03 ~ 397.31 mm,施氮量 207.85 ~ 282.15 kg/hm²。并经过 2 年实测产量的验证,结果均吻合,表明模型具有很好的准确性,可为干旱沙区玉米生产进行预测。

(4)综合考虑干旱沙区玉米生长环境,膜下滴灌施肥的覆膜类型以及不同水氮供应对玉米生长、产量、水分利用效率和氮肥偏生产力的影响,覆盖可降解地膜膜下滴灌施肥,水氮配比为 W3F2 处理(灌水量 2016 年 330 mm、2017 年 390 mm;施氮量 210 kg/hm²)分别对应在不同降雨水平年的最高目标产量范围内,且具有较高的 WUE 与 PFPN,可作为干旱沙区较为合理的水肥管理模式,在保护环境的同时,实现水肥高效利用且能保证玉米产量。

参 考 文 献

- 1 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境,2000(1):1-6.
ZHU Zhaoliang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000(1):1-6. (in Chinese)
- 2 冯鹏,王晓娜,王清邈,等. 水肥耦合效应对玉米产量及青贮品质的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(2):376-384.
FENG Peng, WANG Xiaona, WANG Qingli, et al. Coupling effect of water and fertilizer on yield and silage quality of maize [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(2):376-384. (in Chinese)
- 3 张翔宇,李荫藩,李霄峰,等. 不同施肥量对马铃薯生育及产量的影响[J]. 华北农学报,2005,20(增刊1):142-143.
ZHANG Xiangyu, LI Yinpan, LI Xiaofeng, et al. Effects on growing and yield of potatoes by different quantity of fertilizer application [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2005,20(Supp.1):142-143. (in Chinese)
- 4 樊廷录,李永平,李尚中,等. 旱作地膜玉米密植增产用水效应及土壤水分时空变化[J]. 中国农业科学,2016,49(19):3721-3732.
FAN Tinglu, LI Yongping, LI Shangzhong, et al. Grain yield and water use efficiency and soil water changes of dryland corn with film mulching and close planting[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016,49(19):3721-3732. (in Chinese)
- 5 严昌荣,梅旭荣,何文清,等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报,2006,22(11):269-272.
YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11):269-272. (in Chinese)
- 6 毕继业,王秀芬,朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(11):172-175.
BI Jiye, WANG Xiufang, ZHU Daolin. Effect of plastic-film mulch on crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11):172-175. (in Chinese)
- 7 于浩强,张艳梅,王晓慧,等. 生物降解塑料的研究现状与发展前景[J]. 上海塑料,2012(1):1-5.
YU Haoqiang, ZHANG Yanmei, WANG Xiaohui, et al. Research status and development trend of biodegradable plastics [J]. Shanghai Plastics, 2012(1):1-5. (in Chinese)
- 8 GU X B, LI Y N, DU Y D. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 171:42-50.
- 9 MORENO M M, CIRUJEDA A C, AIBAR J, et al. Soil thermal and productive responses of biodegradable mulch materials in a processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) crop [J]. Soil Research, 2016, 54:207-215.
- 10 李仙岳,彭遵原,史海滨,等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):97-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.015.
LI Xianyue, PENG Zunyuan, SHI Haibin, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):97-103. (in Chinese)
- 11 CHILUNDO M, JOEL A, WESSTROM I, et al. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil [J]. Field Crops Research, 2017, 200:143-162.
- 12 OLSON D M, CORTESERO A M, RAINS G C, et al. Nitrogen and water affect direct and indirect plant systemic induced defense in cotton [J]. Biological Control, 2009, 49:239-244.
- 13 ABDALHI M A M, CHENG J, FENG S, et al. Performance of drip irrigation and nitrogen fertilizer in irrigation water saving and nitrogen use efficiency for waxy maize (*Zea mays* L) and cucumber (*Cucumis sativus* L) under solar greenhouse [J]. Grassland Science, 2016, 62(3):174-187.
- 14 BADR M A, TOHAMY W A, ZAGHLOUL A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region [J]. Agricultural Water Management, 2013, 110:9-15.

- 15 吴立峰,张富仓,范军亮,等.水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):164-172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151223&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.023.
WU Lifeng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Effects of water and fertilizer coupling on cotton yield, net benefits and water use efficiency [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):164-172. (in Chinese)
- 16 邢英英,张富仓,张燕,等.滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水氮利用的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):713-726.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4):713-726. (in Chinese)
- 17 张富仓,高月,焦婉如,等.水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J/OL].农业机械学报,2017,48(3):270-278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170334&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.034.
ZHANG Fucang, GAO Yue, JIAO Wanru, et al. Effects of water and fertilizer supply on growth, water and nutrient use efficiencies of potato in sandy soil of Yulin area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):270-278. (in Chinese)
- 18 谭华,郑德波,邹成林,等.水肥一体膜下滴灌对玉米产量与氮素利用的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):18-23.
TAN Hua, ZHENG Debo, ZOU Chenglin, et al. Effect of drip irrigation and fertilization on grain yield and nitrogen utilization of maize [J]. Journal of Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3):18-23. (in Chinese)
- 19 马忠明,杜少平,薛亮.滴灌施肥条件下砂田设施甜瓜的水肥耦合效应[J].中国农业科学,2016,49(11):2164-2173
MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang. Coupling effects of water and fertilizer on melon in plastic greenhouse of gravel-mulched field under drip fertigation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(11):2164-2173. (in Chinese)
- 20 李建明,潘铜华,王玲慧,等.水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2014,30(10):82-90.
LI Jianming, PAN Tonghua, WANG Linghui, et al. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10):82-90. (in Chinese)
- 21 田军仓,韩丙芳.膜上灌玉米水肥耦合模型及最佳组合方案研究[J].沈阳农业大学学报,2004,35(增刊):396-398.
TIAN Juncang, HAN Bingfang. Model of coupling water with fertilizer upon maize irrigated on plastic film and its optimum combination scheme [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004,35(Supp.):396-398. (in Chinese)
- 22 李楠楠,张忠学.黑龙江半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合效应试验研究[J].中国农村水利水电,2010(6):88-90,94.
LI Nannan, ZHANG Zhongxue. Coupling effects of water and fertilizer on drip irrigation of corns under plastic mulches in semi-arid areas in Heilongjiang Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(6):88-90,94. (in Chinese)
- 23 张忠学,张世伟,郭丹丹,等.玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J/OL].农业机械学报,2017,48(9):206-214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170926&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.026.
ZHANG Zhongxue, ZHANG Shiwei, GUO Dandan, et al. Coupling effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):206-214. (in Chinese)
- 24 何进宇,田军仓.膜下滴灌旱作水稻水肥耦合模型及组合方案优化[J].农业工程学报,2015,31(13):77-82.
HE Jinyu, TIAN Juncang. Model of coupling water with fertilizer and optimum combination scheme of rice cultivated in aerobic soil with drip irrigation under plastic film [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13):77-82. (in Chinese)
- 25 谷晓博,李援农,银敏华,等.降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):184-193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151225&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.025.
GU Xiaobo, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of biodegradable film mulching on root distribution, yield and water use efficiency of winter oilseed rape [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12):184-193. (in Chinese)
- 26 谷晓博,李援农,杜娅丹,等.生物降解膜促进冬油菜养分吸收减少土壤硝态氮累积[J].农业工程学报,2016,32(10):90-97.
GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan, et al. Biodegradable film enhancing nutrient uptake of winter oil seed rape (*Brassica napus* L.) and reducing soil nitrate accumulation [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10):90-97. (in Chinese)
- 27 周昌明,李援农,谷晓博,等.降解膜覆盖种植方式对夏玉米土壤养分和氮素利用的影响[J/OL].农业机械学报,2016,47(2):133-142,112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160218&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.018.
ZHOU Changming, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Effects of biodegradable film mulching planting patterns on soil nutrient and nitrogen use efficiency of summer maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):133-142,112. (in Chinese)
- 28 杨迎春,高玉山,孙云云,等.降解地膜在玉米膜下滴灌栽培中的应用研究[J].玉米科学,2013,21(2):112-115.
YANG Yingchun, GAO Yushan, SUN Yunyun, et al. Application research on degradable plastic film in drip irrigation cultivation of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(2):112-115. (in Chinese)
- 29 申丽霞,王璞,张丽丽.可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J].农业工程学报,2011,27(6):25-30.
SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili, et al. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6):25-30. (in Chinese)
- 30 张杰,任小龙,罗诗峰,等.环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(6):14-19.
ZHANG Jie, REN Xiaolong, LUO Shifeng, et al. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6):14-19. (in Chinese)