

关中地区播前土壤墒情对覆膜旱作夏玉米产量和水分利用的影响

徐志鹏¹, 穆奎¹, 董文俊³, 严惠敏¹, 张体彬^{2,3}, 邹宇锋³, 丁奠元^{1,3}, 冯浩^{2,3}

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于 3 年连续冬小麦—夏玉米覆膜轮作试验,通过校验之后的 AquaCrop 模型设置不同水平的播前土壤墒情,模拟研究关中地区多年历史气候条件下旱作覆膜夏玉米生长和水分利用对播前土壤墒情的响应规律,拟基于播前土壤墒情初步建立覆膜与否的判断标准。结果表明,当土壤初始含水率 $\leq 70\%$ 田间持水量,关中地区夏玉米覆膜产量波动剧烈;覆膜增产率随着降水的增加呈增加趋势。随着土壤初始含水率的增加,覆膜增产效果越来越明显,且趋于稳定;然而覆膜措施的增产效果对降水量越来越不敏感,最终呈稳定趋势。当播前土壤底墒达到 $80\% \sim 85\%$ 田间持水量的水平时,覆膜夏玉米籽粒产量水分利用效率达到最高。综上,有水可保可用是覆膜增产增效的先决条件之一;当土壤初始含水率 $\leq 70\%$ 田间持水量,建议不采用覆膜措施;当土壤初始含水率 $\geq 80\%$ 田间持水量时,建议采用覆膜措施。

关键词: 土壤底墒; 田间持水量; AquaCrop 模型; 耗水量; 水分利用效率

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0123-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.018

Effects of Soil Moisture Content Before Sowing on Summer Maize Yield and Water Use Under Plastic Mulching in Guanzhong Region

XU Zhipeng¹, MU Kui¹, DONG Wenjun³, YAN Huimin¹,

ZHANG Tibin^{2,3}, ZOU Yufeng³, DING Dianyan^{1,3}, FENG Hao^{2,3}

(1.College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009; 2.Institute of

Water and Soil Conservation Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100;

3.Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Plastic mulching (PM) technology can effectively improve the crop productivity in the dryland. However, few studies have been conducted to determine PM effect in different soil moisture conditions before sowing. Based on the winter wheat-summer maize rotation experiment with PM from 2013—2016, the Aquacrop model was tested, and then different levels of soil moisture before sowing were set up in Baoji, Wugong, and Xi'an using the historical climatic data. The response law of the plant growth and water use during summer maize growing seasons to soil moisture before sowing was explored under PM, and the criterion for using PM was established. Results showed that when the initial soil water content before sowing (ISWC) was less than 70% of field capacity (FC), the maize yield greatly fluctuated in the three sites. The yield increment for both non-mulching and PM treatments increased with the precipitation. With the increasing ISWC, the increment in yield became more and more obvious, which was less and less sensitive to precipitation, and finally tended to be stable under PM. When ISWC reached 80% ~ 85% of FC, the maize water use efficiency under PM reached the highest level. To sum up, the soil water availability was one of the prerequisites for the yield promotion effect under PM. When the ISWC is less than 70% of FC, PM is not recommended; when the ISWC is greater than 80% of FC, PM is recommended to farmers.

Keywords: soil moisture before sowing; field capacity; AquaCrop model; water consumption; water use efficiency

收稿日期: 2021-05-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(51709233, 51879223); 中国博士后科学基金项目(2018M632391); 西北农林科技大学中央高校基本科研业务费专项(2452021036)

第一作者: 徐志鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: 794401473@qq.com

通信作者: 丁奠元(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: dyding@yzu.edu.cn

黄土高原地区是我国重要的旱作粮食生产区。由于该地区气候干旱,降雨资源成为该地区最主要的农业用水来源。当地降雨量年际波动较大,有效降雨少而集中,时空分布大,农业生态环境较为脆弱,农业生产受全球变暖的影响突出,气候变化的持续发展为当地农业带来了新的挑战^[1-2]。针对当地降水时空分布特征,地膜覆盖技术已在黄土高原地区广泛应用,并取得较好的稳产增产效果^[3]。然而,由于缺少判断覆膜与否的依据,目前覆膜技术一定程度上存在泛用和滥用的问题^[4],使得“白色污染”问题越来越突出^[5]。鉴于以上现状,如何找到一个农民易懂、易测的指标,寻找并建立一套实施覆膜措施的依据或标准,成为目前黄土高原地区覆膜技术应用中亟需解决的重要问题。

作物播前土壤墒情成为解决上述问题的可能途径。由于该指标是影响作物生长和产量的重要因子^[6],前人已在小麦^[7]、玉米^[8]、谷子和大豆^[9]等作物的生长季对其进行了广泛研究。有研究^[10]表明,浇足底墒水,是培育壮苗的关键一环,也是确保作物稳产的关键;底墒直接决定夏玉米出苗率的高低^[11],增加播前底墒所获得的增产效果显著优于生育期降雨增加的增产效果^[12]。也有研究^[13]表明,增加底墒可以有效提高小麦生育期降雨利用效率,但也增加了生育期的耗水;当底墒不足时,夏玉米产量及植株生物学性状指标均出现下降情形^[14]。目前研究多为盆栽

试验^[11,15],已有的田间试验历时也较短^[16],鲜有考虑区域和年际间降雨时空差异。

鉴于以上研究现状和存在问题,本研究以连续 3 年大田试验为基础,以 AquaCrop 模型为研究工具,结合长期历史气象数据,通过设置不同播前底墒情景,重点研究:(1)播前土壤墒情对夏玉米产量的影响;(2)播前土壤墒情对夏玉米耗水量和水分利用的影响;(3)探究基于播前土壤墒情的黄土高原关中地区实施覆膜技术的参照依据。本研究旨在为地膜覆盖技术在黄土高原地区进一步优化应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2013 年 10 月至 2016 年 6 月在陕西杨凌西北农林科技大学灌溉试验站(108°24'E,34°20'N,)进行。该地区位于黄土高原南部关中平原,海拔 521 m,四季分明,为暖温带半湿润大陆性季风气候,降水量年际分布较大,多年平均降水量 630 mm 左右,主要集中在 7—10 月,无霜期 213 天。供试土壤为中壤土,0—100 cm 土层的平均田间持水量为 23%(质量含水率),凋萎含水率为 8.5%,pH 8.2,土壤容重平均 1.51 g/cm³。土壤有机碳含量 8.14 g/kg,全氮含量 0.95 g/kg,全磷含量 0.83 g/kg,全钾含量 2.42 g/kg,速效磷含量 21.00 mg/kg,速效钾含量 290 mg/kg。该站地下水埋深 60 m 以下,其向上补给水量可忽略不计。试验期间气象数据见图 1。

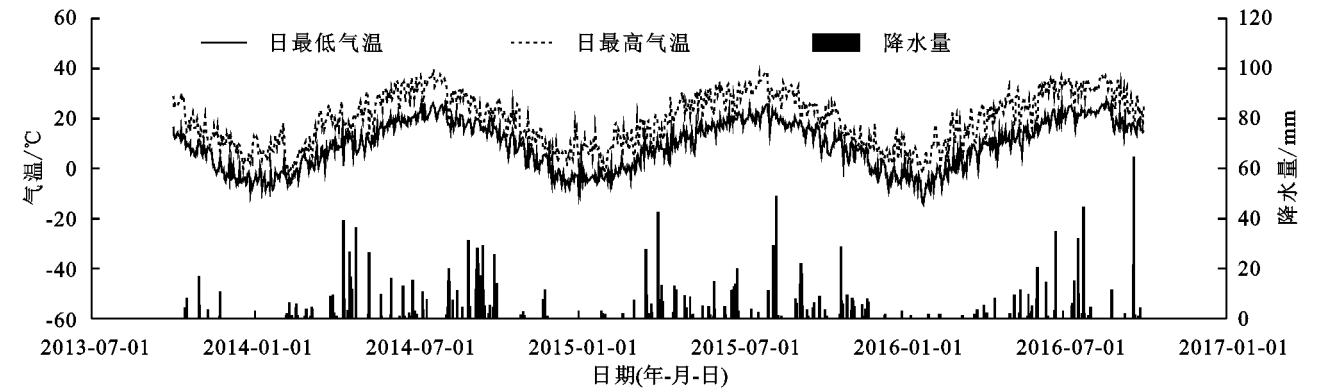


图 1 试验年份气象数据

1.2 试验设计

试验设置裸地不覆膜(CK)和透明地膜覆盖(PM)2 种处理措施。每个处理 3 个重复,共 6 个小区,采用随机区组设计,小区规格 5 m×2 m,小区周围有 0.5 m 的保护行。播种前先进行人工整地、施肥和翻耕,所用地膜为普通聚乙烯塑料薄膜,膜厚 0.008 mm。其中冬小麦先覆膜,然后采用人工条播种植,播种深度为 5 cm,行距 30 cm,返青期追 N 肥 30 kg/hm²(尿素)。夏玉米采用覆膜穴播种植,播种深度为 5 cm,行距 60 cm,株距 40 cm,其他播种、底肥和收获

信息见表 1。

1.3 试验指标测定

1.3.1 土壤剖面水分 土壤 120 cm 深度剖面含水率采用 TRIME—TDR (TRIME—PICO—IPH TDR,德国 IMKO 公司)测定,测定深度范围内以 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60,60—70,70—80,80—90,90—100,100—120 cm 分层。冬小麦大约每 10 天测定 1 次,夏玉米大约每 7 天测定 1 次。TRIME 管分布在小区中间位置,土壤贮水量(SWC,mm)计算公式为:

$$SWC=10\times\rho_i\times\omega_i\times h_i\tag{1}$$

式中: ρ_i 为第 i 层土壤容重(g/cm^3); ω_i 为第 i 层土壤含水量(%); h_i 为第 i 层土层厚度(cm);作物生育期农田耗水量(ET , mm)、水分利用效率(WUE_b , $\text{kg}/(\text{hm}^2\text{ mm})$)和籽粒产量水分利用效率(WUE_y , $\text{kg}/(\text{hm}^2\text{ mm})$)计算公式为:

$$ET=(W1-W2)+P\tag{2}$$

$$WUE_b=\frac{B}{ET}\tag{3}$$

$$WUE_y=\frac{Y}{ET}\tag{4}$$

式中: W_1 为播前土壤贮水量(mm); W_2 为收获时土壤贮水量(mm); P 为作物生育期 $\geq 5\text{ mm}$ 有效降雨量(mm); B 为作物干物质量(kg/hm^2); Y 为作物籽粒产量(kg/hm^2)。

表 1 冬小麦—夏玉米田间试验

作物	品种	N 肥用量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	P 肥用量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	播种时间/ (年-月-日)	播种量	收获时间/ (年-月-日)
2013—2014 冬小麦	小偃 22	120	100	2013-10-09	187.5	2014-06-05
2014 夏玉米	秦龙 14	225	90	2014-06-19	52000	2014-10-10
2014—2015 冬小麦	小偃 22	120	100	2014-10-15	187.5	2015-06-06
2015 夏玉米	秦龙 11	225	90	2015-06-12	52000	2015-10-07
2015—2016 冬小麦	小偃 22	120	100	2015-10-13	187.5	2016-06-05
2016 夏玉米	秦龙 11	225	90	2016-06-10	52000	2016-09-23

注:冬小麦播种量单位为 kg/hm^2 ,夏玉米播种量单位为株/ hm^2 。
1.3.2 作物生长和产量指标 在冬小麦返青后,采用冠层分析仪(SunScan,英国 Delta T 仪器公司)测定各生育期叶面积指数(LAI),每个小区测定 3 次,取平均值。夏玉米于三叶期标记生长均匀,且具有代表性的植株定株,其中每个小区选取 5 株植株,于拔节期、抽雄期、开花期、灌浆期和收获期准确观测并记录植株株高和所有绿叶的叶片长度和最大宽度,用于计算玉米冠层覆盖度(CC)。

在关键生育期选取小麦 5 株、夏玉米 2 株,齐地切断获取完整地上部植株,立即带入实验室称重并置于烘箱杀青 30 min($105\text{ }^{\circ}\text{C}$),烘干($75\text{ }^{\circ}\text{C}$)至恒重,记录干物质重量。冬小麦和夏玉米均人工脱粒烘干,测定籽粒产量。

1.4 AquaCrop 模型输入参数

AquaCrop 模型是由世界粮农组织(Food and Agriculture Organization,FAO)于 2009 年提出的,较好地考虑了覆膜对土壤水分抑制蒸发的影响。模型中需要输入气象参数、作物参数、土壤参数(表 2)、管理参数及初始土壤含水率,其中部分参数由实测值确定,其余参数采用模型中的默认值,或根据实测值进行修正校准。本研究利用 3 年田间观测数据建立模型数据库,总体上由 PM 处理的试验数据率定模型,由 CK 处理的试验数据验证模型。由于地膜覆盖导致的增温效应对作物生长发育及生育期天数具有一定作用,而 AquaCrop 模型忽略了温度的影响,故本研究将覆膜与裸地处理作物生长发育和生育期天数参数分别进行设定,覆膜与裸地处理具体参数见表 3。

1.5 情景设置

选取关中地区宝鸡、武功、西安 3 个典型气象站点作为关中平原的代表区域,地理位置由西到东。年

平均降雨量、玉米生育期平均降雨量和生育期内平均温度由西到东均呈减少趋势,对关中地区的气候条件具有一定的代表性(表 4)。3 个站点播期土壤含水率分别设置田间持水量的 60%(TC60),70%(TC70),75%(TC75),80%(TC80),85%(TC85),90%(TC90)和 95%(TC95)7 种情景,结果呈现以 TC60、TC70、TC80 和 TC90 为主。AquaCrop 模型中,将夏玉米播种日期设为 6 月 10 日,收获日期满足夏玉米自然成熟条件,其他条件与校验结果一致,所需气象资料从中国气象数据网获取。

表 2 土壤初始参数

土层 深度/ cm	田间持水量/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	凋萎系数/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水量/ ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和导水率/ ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)
20—40	32.5	21.8	41.5	256.8
40—60	34.5	22.0	42.3	300.6
60—80	33.5	20.0	46.8	305.0
80—120	30.7	14.1	44.8	292.0

1.6 数据处理

本研究利用 Excel 2016 软件对数据进行预处理,用 SPSS 20.0 软件对数据进行单因素方差分析,采用 LSD 法进行显著性分析($P<0.05$),用 SigmaPlot 12.5 软件作图。冠层覆盖度、生物量和土壤贮水量评价指标为决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和一致性指数(d);产量以及耗水量评价指标为相对误差(RE)。

$$R^2=\frac{[\sum_{i=1}^n(m_i-\overline{m})(s_i-\overline{s})]^2}{\sum_{i=1}^n(m_i-\overline{m})^2\sum_{i=1}^n(s_i-\overline{s})^2}\tag{5}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(m_i-s_i)^2}{n}}\tag{6}$$

$$d=1-\frac{\sum_{i=1}^n(m_i-s_i)^2}{\sum_{i=1}^n(|s_i-\bar{s}|+|m_i-\bar{m}|)^2}\tag{7}$$

$$RE=\frac{s_i-m_i}{m}\times 100\tag{8}$$

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型的校准与验证

120 cm 土壤剖面内贮水量的模拟值与实测值变化趋势非常接近,且大部分模拟值在实测值的误差

棒范围内波动(图 2)。模型率定过程中,裸地处理土壤贮水量的模拟值与实测值之间的 R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.65,15.84 mm 和 0.999,覆膜处理土壤贮水量模拟值与实测数之间的 R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.43,28.70 mm 和 0.998。验证过程中,裸地处理土壤贮水量的模拟值与实测值之间的 R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.65,22.58 mm 和 0.999,覆膜处理土壤贮水量模拟值与实测值之间的 R^2 、RMSE 和 d 分别为 0.67,22.80 mm 和 0.998。

表 3 AquaCrop 模型中的作物参数

参数描述	小麦		玉米	
	CK	PM	CK	PM
基底温度/℃	0	0	8	8
上限温度/℃	26	26	30	30
授粉开始失效时的最低空气温度/℃	5	5	10	10
授粉开始失效时的最高空气温度/℃	35	35	40	40
冠层扩展上限阈值/(% of TAW)	0.3	0.3	0.25	0.25
冠层扩展下限阈值/(% of TAW)	0.65	0.65	0.68	0.68
叶片扩展胁迫系数的曲线形状	2	2	3	3
气孔关闭上限阈值/(% of TAW)	0.68	0.68	0.72	0.72
冠层衰老胁迫系数/(% of TAW)	0.7	0.7	0.67	0.67
根区扩展的形状因子	15	15	13	13
开花期水分胁迫的上限阈值/(% of TAW)	0.85	0.85	0.85	0.85
播种~出苗的有效积温/(℃·d ⁻¹)	150	103	130	110
播种~最大冠层覆盖度的有效积温/(℃·d ⁻¹)	1720	1500	830	825
播种~最大根深的有效积温/(℃·d ⁻¹)	1501	1444	1452	1428
播种~冠层衰老的有效积温/(℃·d ⁻¹)	1900	1950	1524	1500
播种~成熟的有效积温/(℃·d ⁻¹)	2190	2190	1750	1750
播种~开花的有效积温/(℃·d ⁻¹)	1406	1349	1044	1020
授粉期持续时间的有效积温/(℃·d ⁻¹)	722	779	672	708
经济产量持续时间的有效积温/(℃·d ⁻¹)	646	304	180	180
最大根深/m	1.2	1.2	1.8	1.8
最小根深/m	0.3	0.3	0.5	0.5
水分生产力/(g·cm ⁻²)	21	20	36	30
参考收获指数/%	39	39	46	46
地表覆盖类型	裸地	塑料地膜	裸地	塑料地膜

注:CK 为裸地处理;PM 为覆盖处理。

表 4 关中地区降雨基本信息

地点	纬度/ (°)	经度/ (°)	年均 降雨量/mm	年均 气温/℃	玉米生育期	
					平均降雨/mm	平均气温/℃
宝鸡	34.38	107.15	672.1	13.98	387.6	24.4
武功	34.28	108.22	610.4	13.96	334.3	24.7
西安	34.27	108.95	553.9	14.29	296.9	25.4

注:年均值指历史气象数据平均值;宝鸡为 1953—2019 年,武功为 1954—2019 年,西安为 1952—2005 年。

地上部生物量模拟值和实测值变化趋势基本一致(图 3),AquaCrop 模型校验过程中,地上部生物量模拟值和实测值之间的 R^2 分布在 0.82~0.99, RMSE 分布在 0.530~2.529 t/hm², d 分布在 0.975~0.999。在作物生长过程中,冠层覆盖度(CC)随作物生

育期发展而呈单峰曲线变化趋势。在校验过程中,CC 的模拟值与实测值变化趋势基本一致(图 4),其 R^2 为 0.64~0.99, RMSE 分布在 3.531%~17.837%, d 分布在 0.981~0.999。AquaCrop 模型校准过程中,产量模拟值和实测值之间的 RE 分布在 -6.3%~3.9%(表 4)。作物生育期耗水量模拟值和实测值之间的 RE 分布在 -17.1%~16.7%(表 5)。AquaCrop 模型对地上部生物量和耗水量均表现出较好的模拟效果。

2.2 播前土壤墒情对产量的影响

播前土壤墒情对玉米产量影响较为明显。在 TC60 情景下(图 5a1、b1 和 c1,其他 TC 情景以此类推),随着年际变化的发展,玉米产量波动剧烈,宝鸡、

武功和西安 3 个站点部分年份绝产。TC60 情景下 PM 处理的增产作用不明显,宝鸡、武功和西安 PM 处理相对于 CK 处理的增产率分别为 0.15、0.18 和 0.11。在 TC70 情景下,随着年际的变化,播前土壤墒情的优化使

得玉米产量波动程度减小,且宝鸡、武功和西安 3 个站点绝产年份几乎消失。宝鸡、武功和西安 PM 处理相对于 CK 处理的增产率分别增加到 0.23、0.19、0.16,PM 处理呈现出显著的增产作用($P<0.05$)。

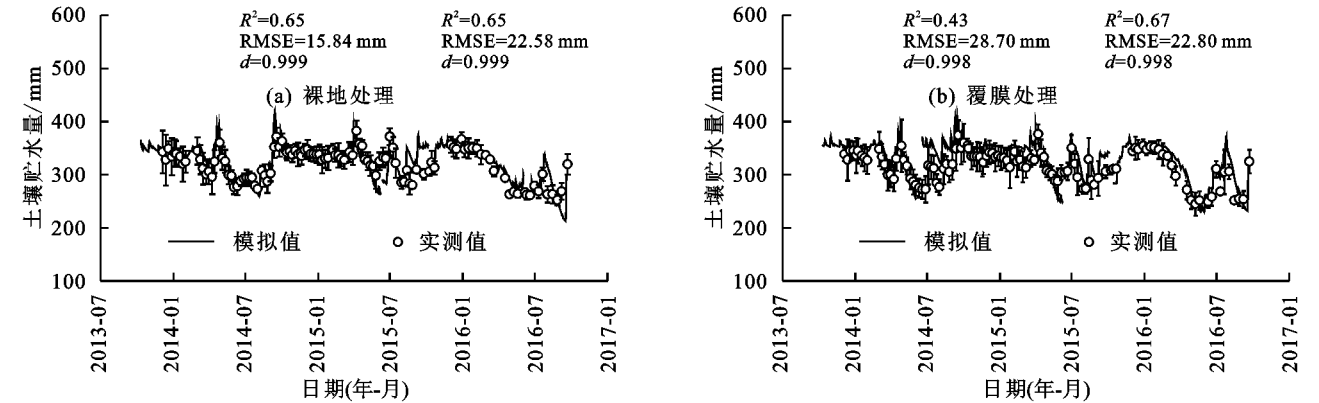


图 2 2013—2016 年覆膜与裸地处理下 1.2 m 土层土壤贮水量模拟和实测结果

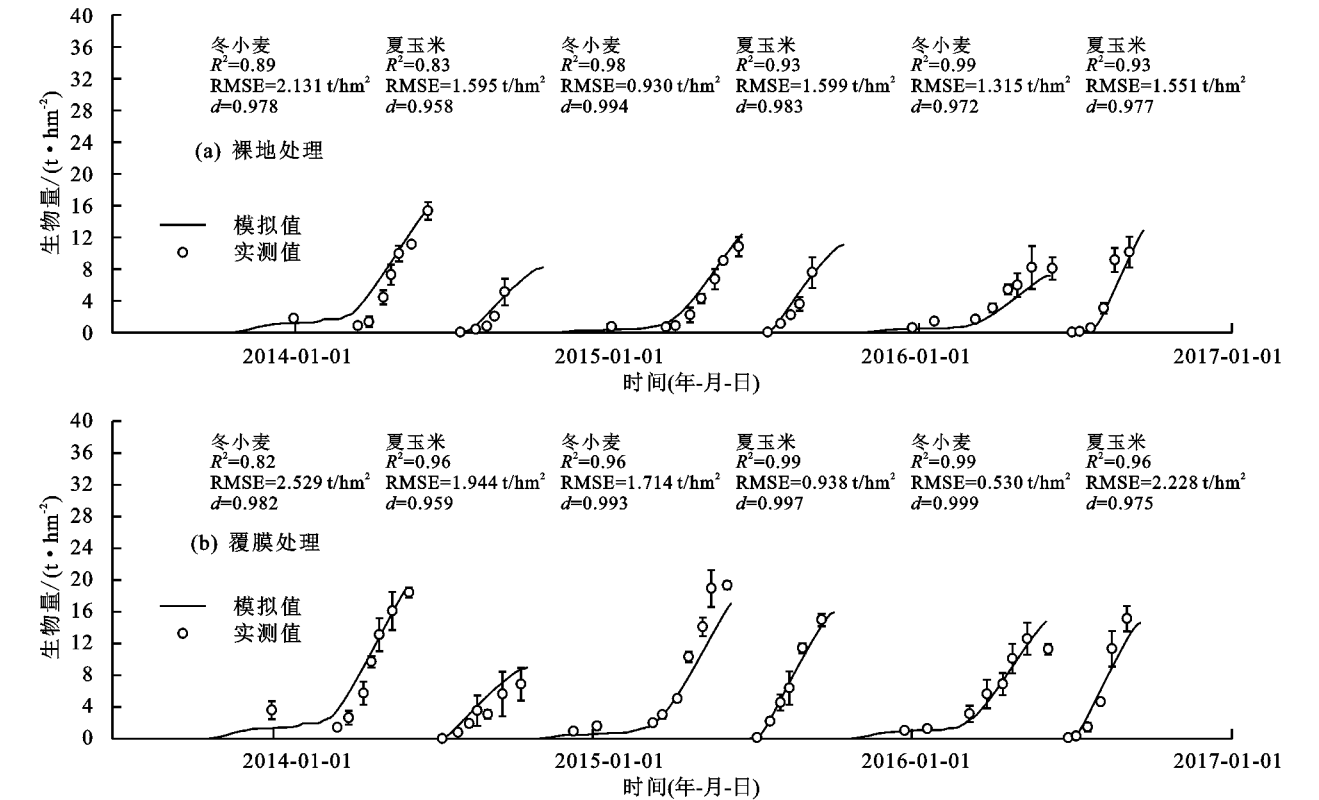


图 3 2013—2016 年覆膜与裸地处理下生物量模拟和实测结果

2.3 降雨增产潜力随底墒的变化

本研究以覆膜增产率(覆膜措施下玉米相对于不覆膜处理的增产率)随降雨量变化的斜率为准建立降雨增产潜力的参数,探究土壤底墒与降雨量变化的互作效应。播前土壤底墒对覆膜增产潜力和降雨的增产潜力影响较大。对于覆膜增产潜力,在 TC60 情景下(图 6a1、b1 和 c1,其他 TC 情景以此类推),随着降雨量的增加,覆膜增产率呈现较为明显的增加趋势,其中宝鸡的覆膜增产率随降雨量呈显著增加趋势($P<0.05$)。在 TC70 情景下,随着降雨量的增加,覆膜增产率趋于平缓波动。在 TC80 和 TC90 情景下,随着降雨量的增加,覆膜增产

率趋于稳定。播前土壤含水量从 60%田间持水量水平增加到 90%田间持水量水平(图 6 中 a1~a4),覆膜增产率与降雨量的线性拟合斜率越来越小,直至变成斜率接近 0 的水平,这表明随着播前土壤含水量的增加,降雨增产潜力越来越小,覆膜增产率对降雨量越来越不敏感。总体来看,播前土壤含水量的增加使得覆膜增产潜力增大并趋于稳定,使得降雨增产潜力减小。

2.4 不同播前土壤墒情下覆膜耗水量及其增长幅度变化

播前土壤墒情对玉米耗水量影响较为明显(表 6、图 7)。总体来看,宝鸡、武功和西安 3 地均随着玉

米播前土壤含水量的增加,其耗水量呈逐渐增加趋势;相比 CK 处理,PM 处理的耗水量增加更大,但不明显。结果表明,地膜覆盖技术虽然可以保蓄旱地土

壤水分,提高产量,但是覆膜只能改变耗水中土壤蒸发与植株蒸腾结构。随着作物产量的增加,植株蒸腾不断提升,总耗水量也随之增加。

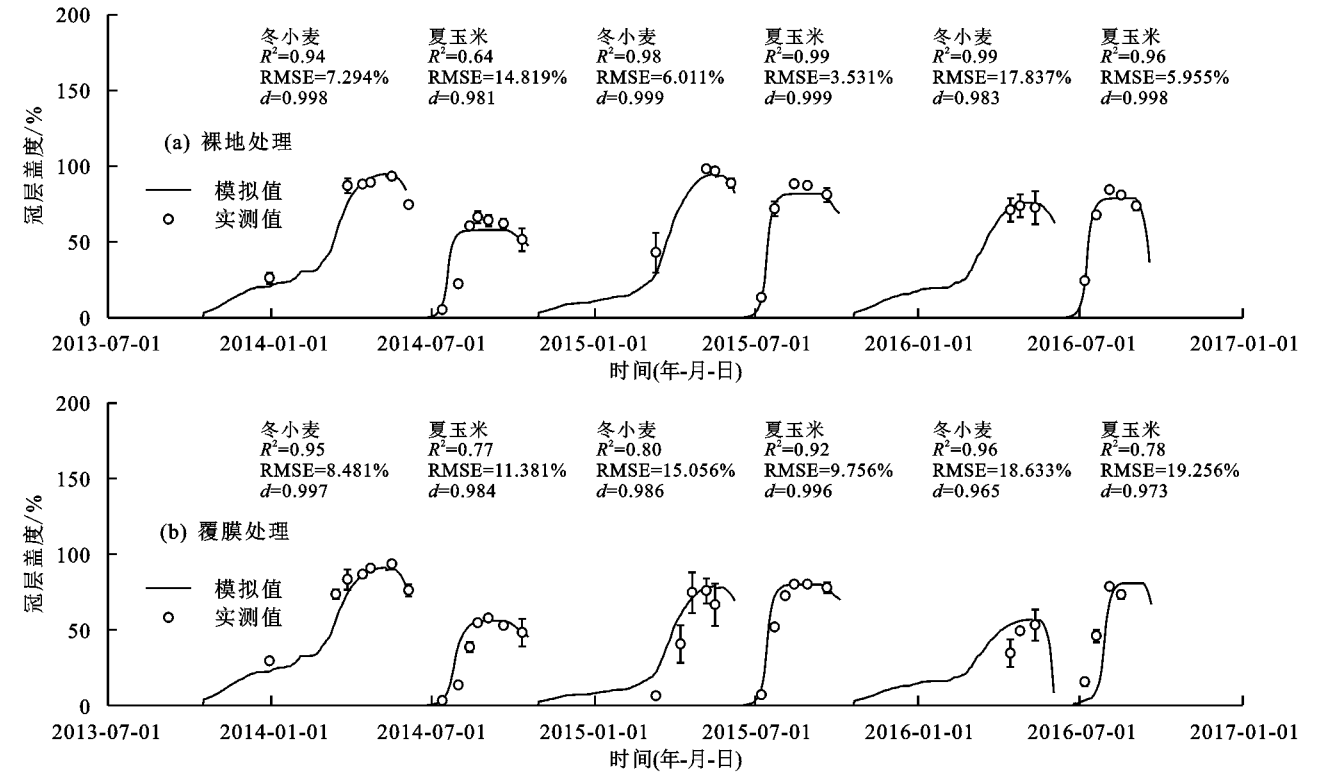


图 4 2013—2016 年覆膜与裸地处理下冠层覆盖度模拟和实测结果

表 5 2013—2016 年冬小麦—夏玉米轮作系统产量和耗水量的模拟值和实测值

年份	作物	处理	产量			耗水量		
			实测值/	模拟值/	RE/%	实测值/mm	模拟值/mm	RE/%
			(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)				
2013—2014	冬小麦	CK	5881.5±471.4a	5927	0.8	—	327.9	—
		PM	6921.9±265.4b	6931	0.1	—	348.7	—
2014	夏玉米	CK	3715.2±462.0a	3805	2.4	328.2	368.0	12.0
		PM	4551.2±154.7b	4577	0.6	308.2	335.2	8.8
2014—2015	冬小麦	CK	5195.5±790.3a	4869	−6.3	275.2	305.8	11.1
		PM	7400.9±463.9b	7398	0.0	286.9	332.5	15.9
2015	夏玉米	CK	5179.8±669.0a	5116	−1.2	294.3	258.8	−12.1
		PM	6547.7±1053.2b	6740	2.9	276.1	295.4	7.0
2015—2016	冬小麦	CK	2752.0±91.1a	2820	2.5	248.6	254.6	2.4
		PM	5619.1±1111.0b	5837	3.9	226.3	187.5	−17.1
2016	夏玉米	CK	4986.8±494.7a	5008	0.4	236.8	276.3	16.7
		PM	6153.3±712.5b	6175	0.4	241.9	251.4	3.9

注:实测值数据为平均值±标准差;同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

在 TC80 情景下,随着年际的变化,播前土壤墒情的优化使得玉米产量波动程度进一步减小;宝鸡、武功和西安 PM 处理相对于 CK 处理的增产率分别为 0.28,0.27,0.25,PM 表现出极显著的增产作用(P<0.01)。在 TC90 情景下,随着年际的变化,玉米产量波动程度更小。宝鸡、武功和西安 PM 处理相对于 CK 处理的增产率分别为 0.29,0.29,0.27,PM 表现出极显著的增产作用(P<0.01)。总体来看,随着播前土壤含水量的增加,夏玉米产量逐渐增加并呈稳

定趋势,并且 PM 处理的增产作用越来越显著。

播前土壤含水量对覆膜耗水量增长幅度影响不显著(图 8)。数据结果表明,不同播前土壤含水量水平下,覆膜措施对夏玉米耗水量增长幅度影响较小,其中宝鸡有 1/2 以上的年份耗水量增长幅度在 0.02 以下,武功有 1/2 以上的年份耗水量增长幅度在 0.05 以下,西安有 1/2 左右的年份耗水量增长幅度在 0.1 以下(表 7)。总体来看,覆膜处理导致的土壤耗水量增加不明显,覆膜处理在使夏玉米产量增加的同时并没有导致总耗水量的明显变化。

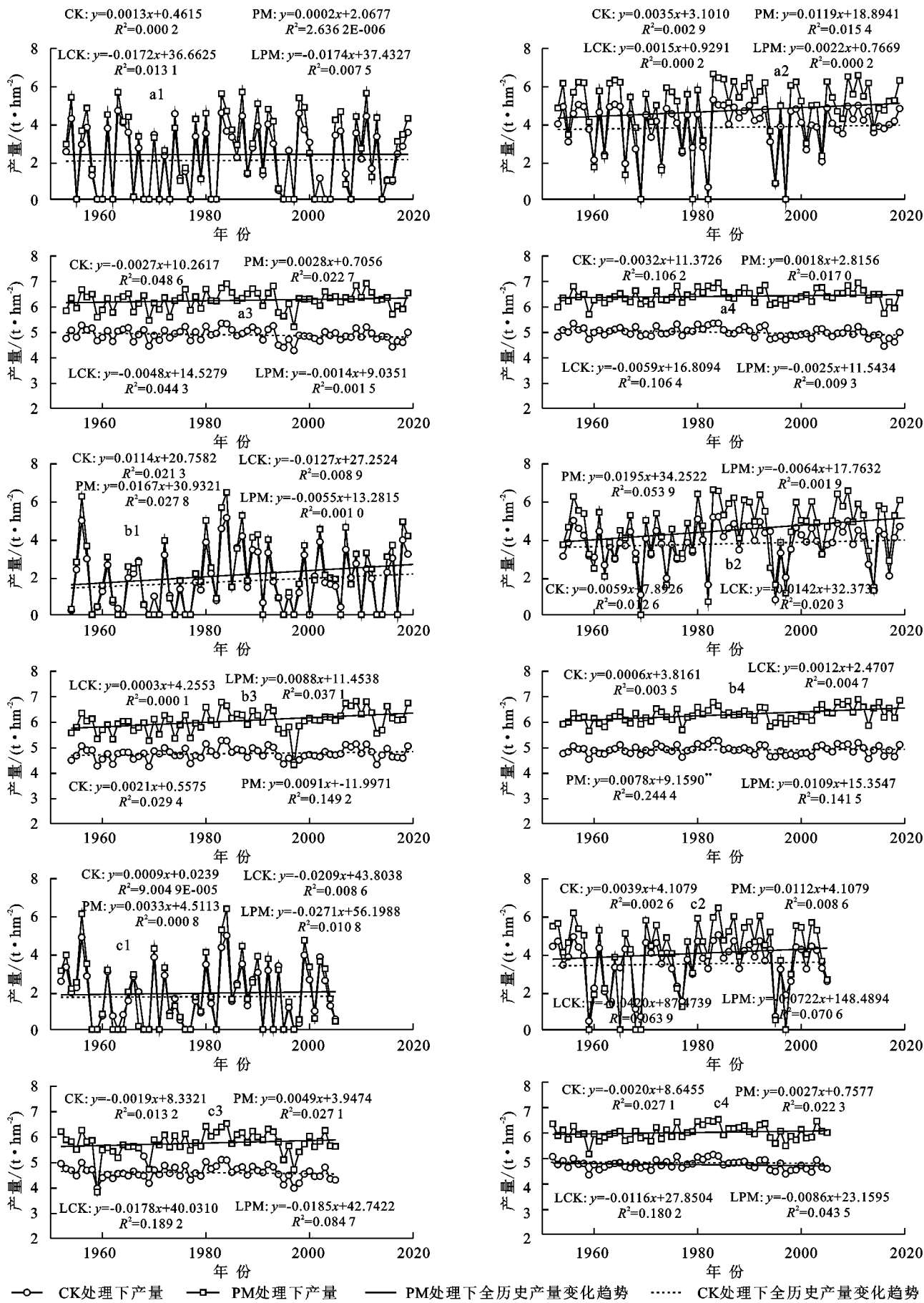
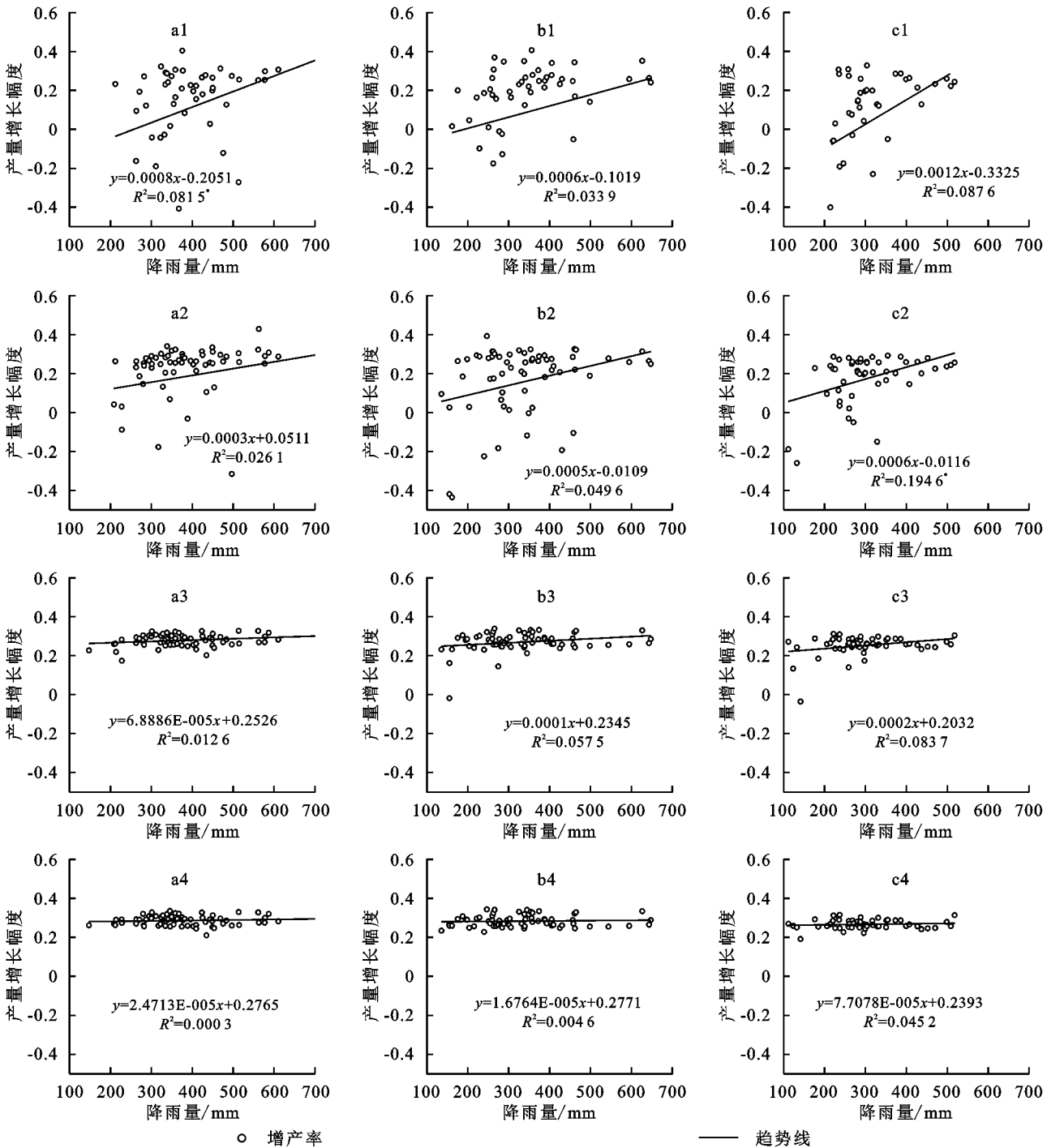


图 5 覆膜与不覆膜处理的夏玉米产量对气候变化的响应



注:a为宝鸡;b为武功;c为西安;1为初始含水率为60%田间持水量;2为初始含水率为70%田间持水量;3为初始含水率为80%田间持水量;4为初始含水率为90%田间持水量;a1、a2、b1、b2、c1、c2中部分点增长幅度小于-0.4,未在图中展现。

图 6 夏玉米增产率在不同初始含水率下的变化

表 6 不同情景下多年平均耗水量

单位:mm

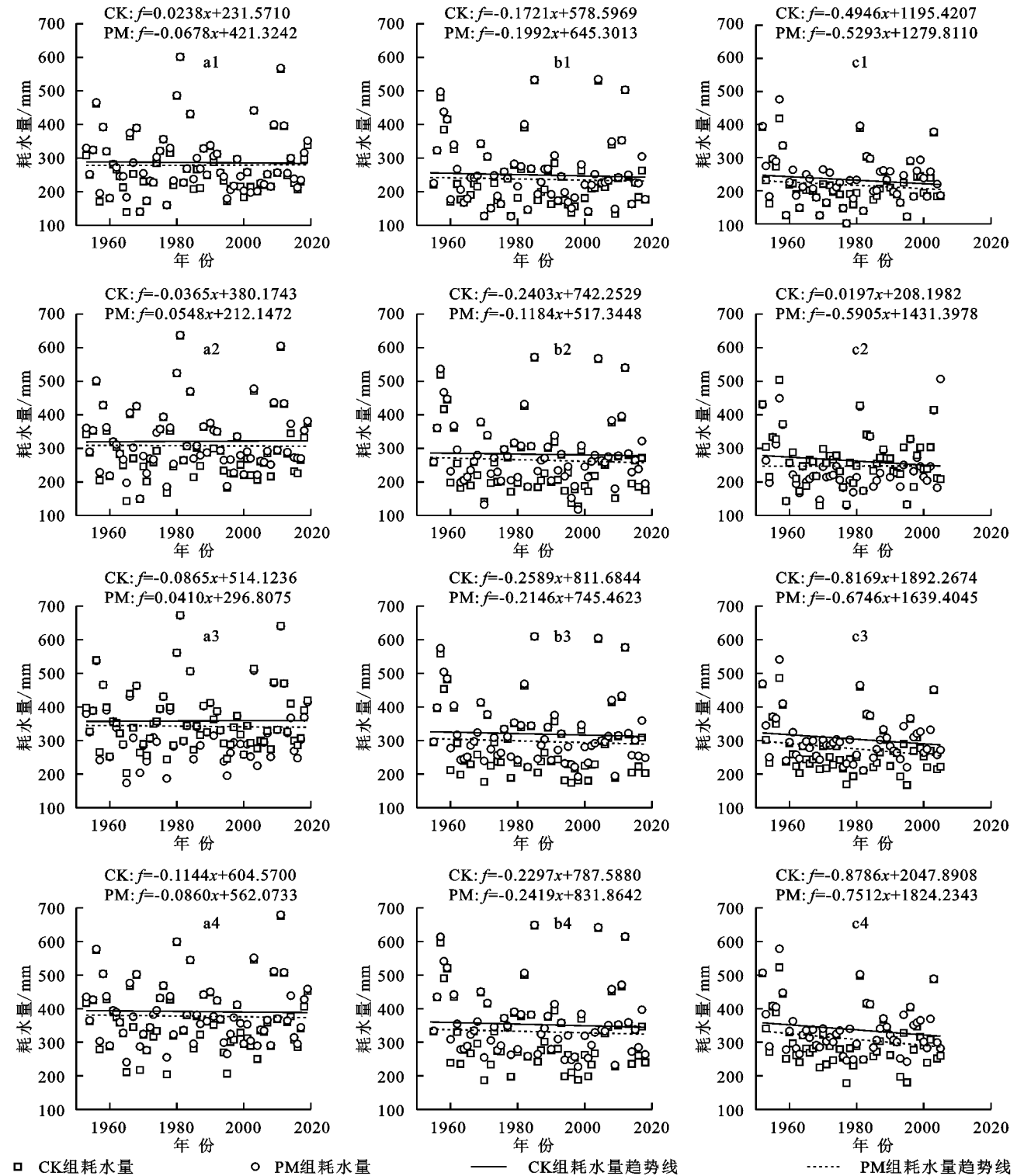
情景组	CK 处理多年平均耗水量			PM 处理多年平均耗水量		
	宝鸡	武功	西安	宝鸡	武功	西安
TC60	278.9	239.7	216.9	286.7	253.3	232.6
TC70	307.8	268.3	247.3	321.0	286.5	263.1
TC80	342.3	286.5	263.1	258.3	324.0	304.8
TC90	377.3	335.6	309.6	391.3	357.6	338.0

注:表中情景组中的 TC60、TC70、TC80、TC90 分别指土壤含水率设置为田间持水量的 60%(TC60),70%(TC70),80%(TC80)和 90%(TC90)。

2.5 播前土壤墒情对夏玉米籽粒产量水分利用效率的影响

播前土壤墒情对夏玉米籽粒产量水分利用效率影响较为明显(图 9),宝鸡、武功和西安 3 地各组中 PM 处理籽粒产量水分利用效率均大于 CK 处理籽粒产量水分利用效率。随着初始含水率水平升高,夏玉米籽粒产量水分利用效率总体上也呈上升趋势。在产量相对较低的初始含水率水平(TC60 情景,即图 9 中 a1、b1 和 c1,其他 TC 情景以此类推)组中,PM 处理相对于 CK 处理对夏玉米籽粒产量水分利

用效率基本不存在差异。在 TC70 情景下,2 种处理夏玉米籽粒产量水分利用效率差异开始出现。而在产量相对较高的 TC80 和 TC90 组中,PM 处理相对于 CK 处理对夏玉米籽粒产量水分利用效率呈现明显的提升效应。总体来看,随着播前土壤含水量的增加,夏玉米籽粒产量水分利用效率呈逐渐升高趋势。



注:a 为宝鸡;b 为武功;c 为西安;1 为初始含水率为 60%田间持水量;2 为初始含水率为 70%田间持水量;3 为初始含水率为 80%田间持水量;4 为初始含水率为 90%田间持水量;初始含水率从 60%~95%,每隔 5%均设置对照组,但在图中未全部展现。下同。

图 7 各初始含水率下夏玉米耗水量变化趋势

3 讨论

3.1 AquaCrop 模型在关中地区的适用性

前人^[17]已经对 AquaCrop 模型在关中地区的适用性进行了较多研究。结果表明,AquaCrop 模型可以适应

西北半湿润地区不同覆盖方式,能够较好地模拟关中地区夏玉米和冬小麦的生长。本研究基于 3 年田间试验数据,对 AquaCrop 模型模拟连续覆膜条件下冬小麦—夏玉米轮作系统作物生长发育进行校验。经过校准和

验证,AquaCrop 模型可以较好地模拟连续覆膜条件下作物的土壤贮水量、生长动态和作物的产量。

表 7 各情景下耗水量增长幅度的年份数目占总年份数目的比重

情景组	宝鸡耗水量增长幅度			武功耗水量增长幅度			西安耗水量增长幅度		
	≤0.02	≤0.05	≤0.1	≤0.02	≤0.05	≤0.1	≤0.02	≤0.05	≤0.1
TC60	0.63	0.75	0.85	0.48	0.62	0.71	0.54	0.57	0.65
TC70	0.55	0.66	0.75	0.49	0.54	0.63	0.43	0.50	0.54
TC80	0.57	0.64	0.75	0.45	0.55	0.62	0.33	0.41	0.46
TC90	0.61	0.72	0.84	0.49	0.58	0.66	0.33	0.41	0.52

注:表中情景组中的 TC60~TC90 分别指土壤含水率设置为田间持水量的 60%(TC60),70%(TC70),80%(TC80)和 90%(TC90)。

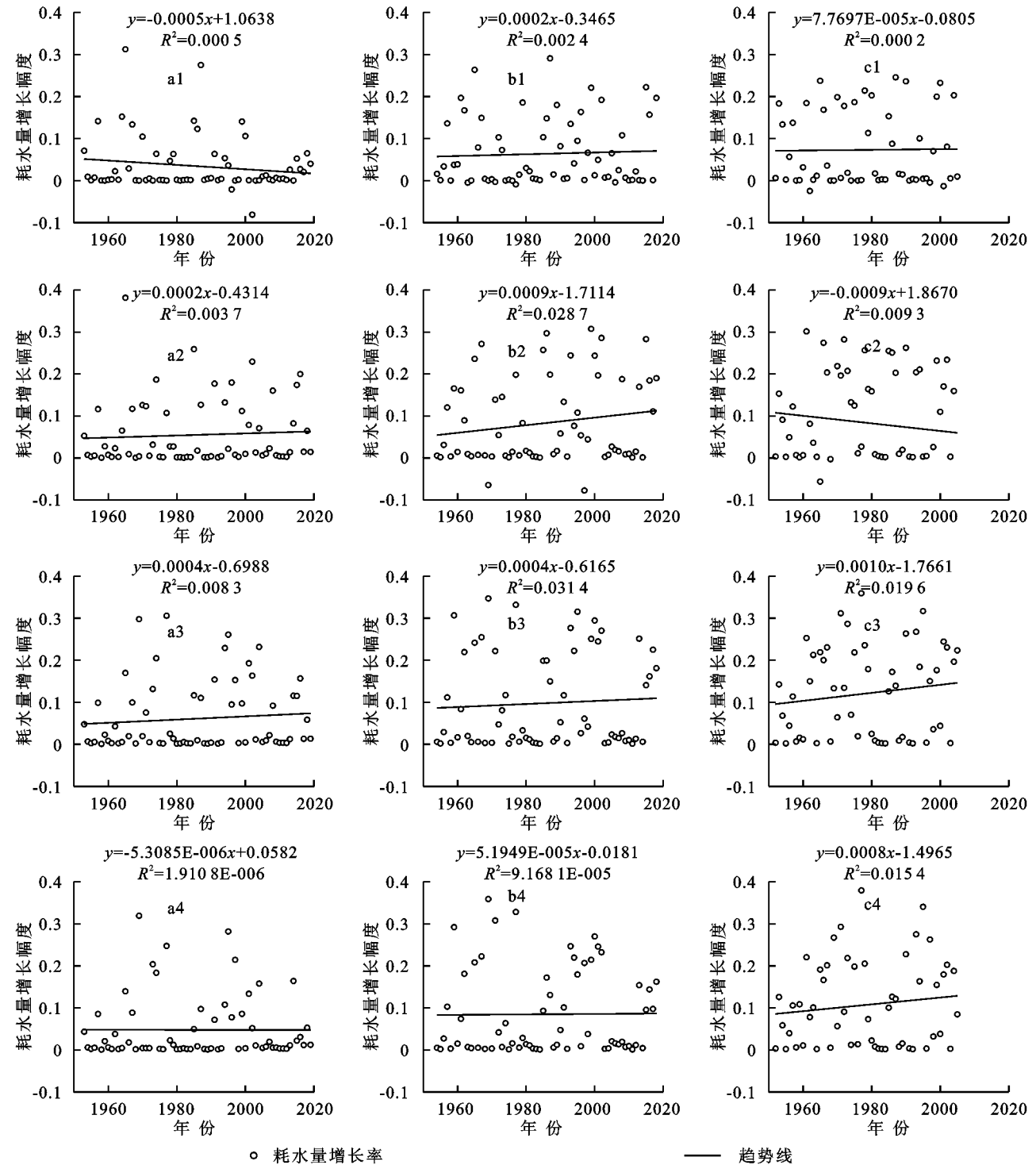


图 8 各初始含水率下覆膜夏玉米耗水量变化

3.2 覆膜玉米产量对播前土壤底墒的响应 较大,有些情况下会出现覆膜减产减收情况^[18]。在本研究由于关中地区年度降水变率大,导致土壤墒情变化 研究的 3 个地区的模型模拟中,当播前底墒处于较低水平

($\leq 70\%$ 田间持水量)时,覆膜与不覆膜处理均出现较大的产量波动,且均出现覆膜减产甚至绝产的现象。深入研究发现,覆膜减产的大多数年份与夏玉米生育期中的降雨量低于当地六十多年的玉米生育期降雨平均值的年份相重合。出现这种情景的原因:一方面,每个年份在玉米生长季前期的降雨量是不同的,当将降雨量少时,播期水分胁迫会严重降低玉米出苗率。土壤水分含量与玉米出苗率关系密切,虽然玉米从萌发到出苗这一阶段需水较少,但这一时期对水分最为敏感^[19]。研究^[20]表明,土壤底墒对苗的生长存在着一个阈值,低于阈值后叶片水分状况、气孔导度、光合作用都迅

速降低。水分胁迫条件下,玉米生育前期受到水分胁迫,无法满足覆膜条件下玉米植株生长发育,影响光合作用进行,导致干物质累积减少,从而导致减产;在较为干旱的状况下,玉米产量与播种期土壤水分含量呈正相关关系^[21]。另一方面,关键生育期内降雨的差异是重要的影响因素。覆膜措施促进了玉米前期生长,使得土壤水分过度消耗,后期降雨无法持续满足玉米生长的需求。研究^[22]表明,玉米在抽雄前后水分不足,生育后期虽有大量降水,但玉米繁殖器官发育不良,源库关系的失调造成了同化产物的浪费是地膜覆盖玉米产量下降的直接原因。

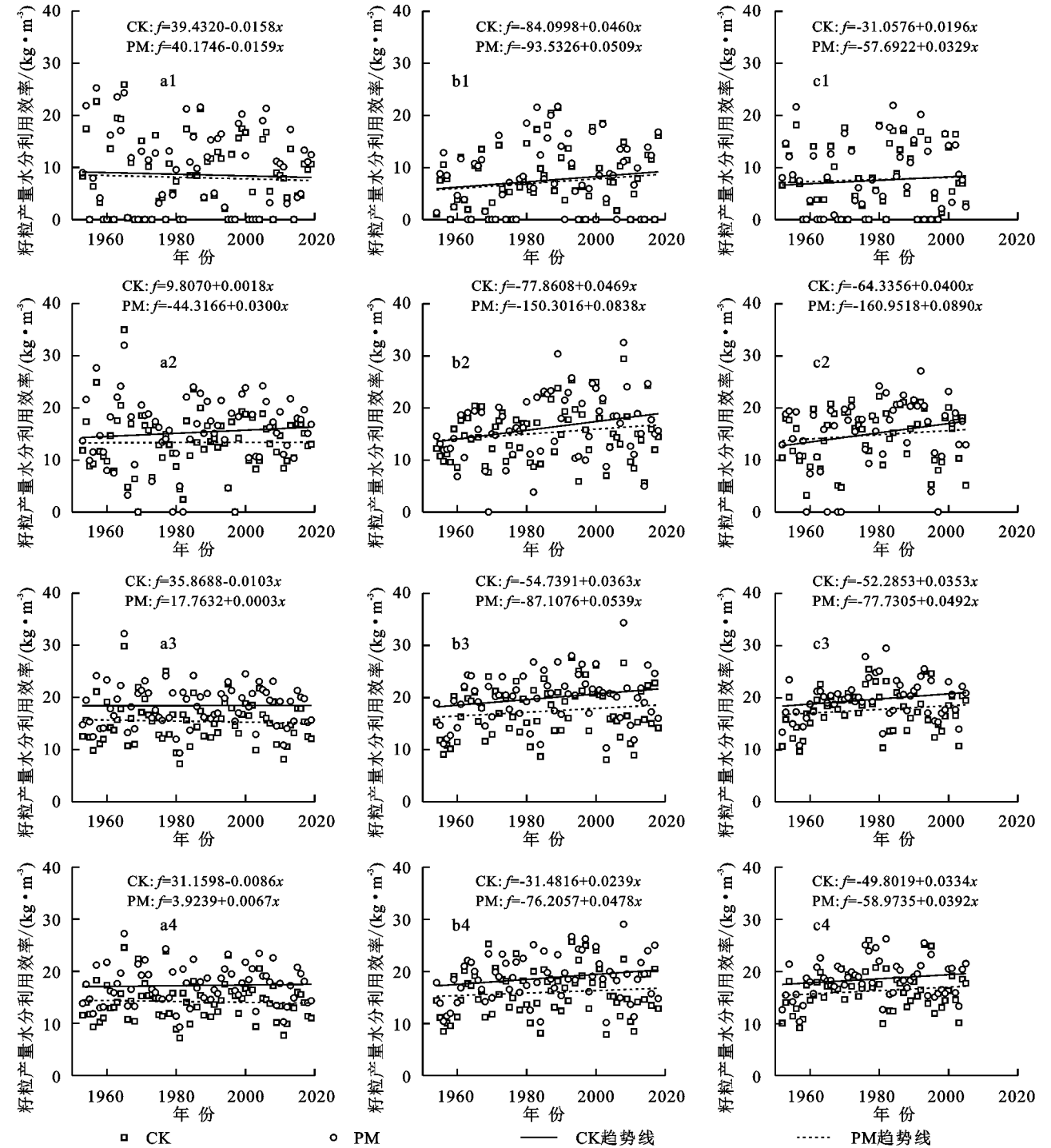


图 9 各初始含水率下夏玉米籽粒产量水分利用效率

对不同播前土壤墒情下的产量进行比较发现,随着播前土壤含水量的提高,玉米产量也呈明显的增加趋势。与此同时,覆膜的增产效果明显随着播前土壤墒情水平的提高而增强。因此,地膜覆盖增产是有条件的,必须以有墒可保,有温可增,有肥可供,作为显著增产效益的先决条件^[23]。为充分发挥覆膜措施在关中地区的农业生产中稳产增产的作用,应当将土壤初始含水率纳入考量。当播前土壤底墒 $\leq 70\%$ 田间持水量时,考虑到覆膜相关的成本,旱作条件下不推荐采用覆膜措施;当播前底墒 $\geq 80\%$ 田间持水量时,建议采用覆膜措施。

本研究主要考虑旱作条件,对于关中平原地区有灌溉条件的地区,可以考虑播后灌水到底墒 $\geq 80\%$ 田间持水量。此外,覆膜条件下,当土壤底墒 $\geq 80\%$ 田间持水量后,玉米产量对增加的降雨量,即增加的水分不再敏感。因此,播后灌水到底墒 $\geq 80\%$ 田间持水量时,“灌一水”基本能够满足玉米的生长条件。

3.3 覆膜玉米水分利用效率对播前土壤底墒的响应

本研究中,覆膜措施在总的耗水量没有显著差异的情况下,随着播前土壤初始含水量的增加,夏玉米产量也随之提高,进而提高作物籽粒水分利用效率。然而籽粒水分利用效率并不是随着播前土壤含水量水平的提高而一直呈升高趋势。结果表明,在播前土壤含水量为 85% 田间持水量时,相较于播前土壤含水量为 80% 水平下籽粒水分利用效率均有降低趋势。由此可以推测,播前土壤含水量在 $80\% \sim 85\%$ 时可以获得关中平原地区夏玉米最佳籽粒水分利用效率。刘庚山等^[16]在华北平原北部高产农业区的大田试验研究中发现,籽粒重和底墒之间符合二次曲线关系,并得出当地最佳播种时的底墒为 85.4% ,也证明本研究的研究结果。因此,为提高籽粒水分利用效率,应确保土壤底墒达到土壤含水量在 $80\% \sim 85\%$ 田间持水量的水平。

3.4 覆膜玉米耗水量对播前土壤底墒的响应

随着播前土壤底墒水平的提升,作物产量随之增加,耗水量也自然而然地随之增加。然而,PM处理的耗水量较CK处理并没有显著的增加。对于覆膜系统可持续性的问题,前人^[24-25]研究发现,随着土壤耗水量的增加及连续种植时间的加长,干旱、半干旱地区农田土体的水分含量将呈现出逐年下降趋势。本研究中提升播前土壤底墒水平是一个保证覆膜生产系统可持续性的适宜方式。结果显示,以 $\geq 80\%$ 田间持水量的播前土壤底墒水平作为条件,可以在实现关中地区覆膜增产的前提下,而不显著增加土壤的耗水量,这有助于实现黄土高原南部生产系统的可持续性。

4 结论

(1)当土壤初始含水率 $\leq 70\%$ 田间持水量,关中

地区夏玉米覆膜产量波动剧烈;覆膜措施对夏玉米增产效果对降水量比较敏感,覆膜增产率随着降水的增加呈增加趋势;当土壤初始含水率 $\geq 80\%$ 田间持水量时,关中地区夏玉米覆膜增产效果显著,且趋于稳定;覆膜措施对夏玉米增产效果对降水量不敏感,覆膜增产率呈稳定趋势。

(2)以 $\geq 80\%$ 田间持水量的播前土壤底墒水平作为条件,可以在实现关中地区覆膜增产的前提下,而不显著增加土壤的耗水量。因此,当土壤初始含水率 $\leq 70\%$ 田间持水量时,建议不采用覆膜措施;当土壤初始含水率 $\geq 80\%$ 田间持水量时,建议采用覆膜措施。

(3)播前土壤含水量在 $80\% \sim 85\%$ 时可以获得关中平原地区夏玉米最佳籽粒水分利用效率。为保证关中地区夏玉米水分高效利用和高产,应采取适当措施(如播后灌水1次),保证播种前后土壤底墒达到 $80\% \sim 85\%$ 田间持水量的水平。

参考文献:

- [1] FAO. Food Outlook 06[M/OL]. <http://www.fao.org/3/ca9509en/ca9509en.pdf>.
- [2] 吕新业,冀县卿.关于中国粮食安全问题的再思考[J].农业经济问题,2013,34(9):15-24.
- [3] Wang Y P, Li X G, Zhu J, et al. Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on dryland maize productivity in semiarid areas in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 220: 160-169.
- [4] 严昌荣,刘恩科,舒帆,等.我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J].农业环境科学学报,2014,31(2):95-102.
- [5] 李仙岳,冷旭,张景俊,等.北方干旱区降解膜覆盖农田玉米生长和氮素利用模拟及优化[J].农业工程学报,2020,36(5):113-121.
- [6] 原亚琦,孙敏,林文,等.底墒和磷肥对旱地冬小麦产量及其品质的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(3):50-56.
- [7] 孟晓瑜,王朝辉,李富翠,等.底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):369-375.
- [8] 张建军,樊廷录,党翼,等.覆膜时期与施氮量对旱地玉米土壤耗水特征及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):72-78.
- [9] 张玉龙,邹洪涛,杨宇,等.辽西半干旱地区春播前土壤墒情变化的研究[J].水土保持学报,2004,18(6):179-182.
- [10] 梁连友,李立科.渭北旱地冬小麦生产中底墒肥关系及其对产量的影响[J].陕西农业科学,1995(2):7-13.
- [11] 侯玉虹,尹光华,刘作新,等.土壤底墒与苗期灌溉量对玉米出苗和苗期生长发育的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(4):51-57.
- [12] 李全起,房全孝,陈雨海,等.底墒差异对夏玉米耗水特性及产量的影响[J].农业工程学报,2004,20(2):93-96.

(下转第 143 页)

[15] 鲁如坤.土壤农化化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999.

[16] 卜耀军,朱清科,包耀贤,等.陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J].水土保持学报,2014,28(3):153-157.

[17] 潘昭隆,刘会芳,赵帅翔,等.氮肥投入对不同土壤类型电导率变化的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(4):533-537.

[18] 王晓荣,胡文杰,庞宏东,等.湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J].中南林业科技大学学报,2020,40(11):156-166.

[19] 秦娟,唐心红,杨雪梅.马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J].生态环境学报,2013,22(4):598-604.

[20] 李常准,陈立新,段文标,等.凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):100-109.

[21] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等.林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响[J].北京林业大学学报,2019,41(12):108-118.

[22] Xue L, Li Q, Chen H. Effects of a wildfire on selected physical, chemical and biochemical soil properties in a *Pinus massoniana* forest in south China[J]. Forests, 2014,5(12):2947-2966.

[23] 张荣,李婷婷,金锁,等.人为干扰对蒙顶山木荷次生林物种多样性及土壤理化性质的影响[J].浙江农林大学学报,2020,37(5):867-875.

[24] 朱海强,李艳红,张小萌.艾比湖湿地不同植物群落下土壤全磷空间变异[J].水土保持研究,2017,24(5):45-50.

[25] 吕倩,尹海锋,何朋俊,等.马尾松人工林目标树经营初期对土壤理化性质与植物多样性的影响[J].应用与环境生物学报,2018,24(3):500-507.

[26] Trasar-Cepeda C, Leirós M C, Gil-Sotres F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(9):2146-2155.

[27] 张童,刘宇飞,隋心,等.土地利用方式对黑龙江西部地区土壤理化性质和酶活性的影响[J].农学学报,2021,11(5):33-41.

[28] Teng Y, Zhou Q. Response of soil enzymes, functional bacterial groups, and microbial communities exposed to sudan I-IV [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018,166(30):328-335.

[29] Yang L, Zhang Y, Li F. Soil enzyme activities and soil fertility dynamics[J]. Springer Netherlands, 2012, 892(11):143-156.

[30] 韩天一,张邦文,金苏蓉,等.江西红壤丘陵区主要森林类型土壤养分特征及评价[J].南方林业科学,2017,45(6):1-4,21.

(上接第 134 页)

[13] 邓妍,高志强,孙敏,等.夏闲期深翻覆盖对旱地麦田土壤水分及产量的影响[J].应用生态学报,2014,25(1):132-138.

[14] 夏来坤,刘京宝,乔江方,等.不同底墒处理对夏玉米生长发育及产量的影响[J].中国农学通报,2014,30(27):66-71.

[15] 谢倩,陈冠英,陶洪斌,等.玉米播种期水分胁迫及补水对幼苗生长的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(6):16-24.

[16] 刘庚山,郭安红,安顺清,等.底墒对小麦根冠生长及土壤水分利用的影响[J].自然灾害学报,2003,12(3):149-154.

[17] 冯浩,刘匡,余坤,等.不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):192-202.

[18] 杜延军,李自珍,李凤民.半干旱黄土高原地区地膜覆盖和底墒对春小麦生长及产量的影响[J].西北植物学报,2004,24(3):404-411.

[19] 侯玉虹,尹光华,刘作新,等.土壤含水量对玉米出苗率及苗期生长的影响[J].安徽农学通报,2007,13(1):70-73.

[20] 陈培元,李英.限量灌溉对冬小麦抗旱增产和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,1992,10(1):48-52.

[21] Nielsen D C, Vigil M F, Benjamin J G. The variable response of dry land corn yield to soil water content at planting[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96: 330-336.

[22] 张冬梅,池宝亮,黄学芳,等.地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J].农业工程学报,2008,24(4):99-102.

[23] 薛俊武,任稳江,严昌荣,等.覆膜和垄作对黄土高原马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].中国农业气象,2014,35(1):74-79.

[24] 何立谦,张维宏,杜雄,等.土下覆膜与适宜灌水提高冬小麦水分利用率[J].农业工程学报,2016,32(增刊 1):94-104.

[25] 李世清,李东方,李凤民.半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(5):21-29.