文章编号:1000-7601(2020)01-0001-12

旱作覆膜玉米生长和水分利用对气候变化的响应

董文俊1,刘健峰2,丁奠元1,2,陈紫薇1,李 悦1,王乃江1,冯 浩1,3

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

摘要:基于3 a 连续冬小麦-夏玉米覆膜轮作试验校准和验证 AquaCrop 模型的适用性,模拟研究了气候变化 对夏玉米生长、产量和水分利用的影响,分析了覆膜措施对气候变化的应对效果。结果表明:关中地区(以武功、宝 鸡和西安地区为例)年平均温度呈逐年递增趋势,温度增加幅度由高到低依次为宝鸡、西安和武功,增温速率分别为 0.20、0.12 ℃ · 10a⁻¹和 0.09 ℃ · 10a⁻¹;降雨量呈逐年递减趋势,减少幅度大小依次为西安、宝鸡和武功,减小量分别 为 3.59、3.23 mm · 10a⁻¹和 2.64 mm · 10a⁻¹。AquaCrop 模型在关中地区表现出了良好的适用性,可以较好地模拟连 续覆膜条件下作物的产量指标、水分利用和生长的动态变化,冠层覆盖度模拟值和实测值之间的均方根误差 (*RMSE*)介于 1.1%~15.3%,生物量模拟值和实测值之间的*RMSE*介于 0.626~2.540 t · hm⁻²,土壤贮水量模拟值和实 测值之间的*RMSE*介于 12.6~47.4 mm。模拟研究表明,上世纪 60 年代以来,随着气温不断升高,武功、宝鸡和西安 地区的夏玉米生育期均呈逐年缩短趋势,特别是 1980s 以来,减少幅度达 2.76、4.82 d · 10a⁻¹和 5.94 d · 10a⁻¹;在不同 的降水年型下,覆膜处理产量均高于裸地处理,且其变异系数较小;在干旱气候条件下,覆膜处理依然可以获得一定 的籽粒产量,与裸地处理相比,覆膜处理表现出了较好的稳产效应。同时,覆膜处理有效减少了玉米苗期土壤表层 蒸发(平均减少 7.6 mm),从而在土壤中保蓄更多的降雨;覆膜处理虽然增加了土壤耗水量,但其通过保蓄土壤水分, 稳定作物产量,有效提高了玉米的水分利用效率。因此,关中地区旱作覆膜可以有效适应当地气候变化,在一定程 度上应对干旱气候,具有较好的增产稳产效应。

Response of maize growth and water utilization under plastic mulching in dryland to climate change

DONG Wenjun¹, LIU Jianfeng², DING Dianyuan^{1,2}, CHEN Ziwei¹,

Li Yue¹, Wang Naijiang¹, Feng Hao^{1,3}

(1.College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest Agricultural and Forest University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
 2.School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The applicability of AquaCrop model was calibrated and verified based on the experiment of winter wheat-summer maize rotation under mulching from October 2013 to June 2016. The effects of climate change on the growth, yield, and water utilization of summer maize were simulated, and the effects of mulching on impact of climate change were analyzed. The results showed that the average annual temperature in Guanzhong (Wugong, Baoji, and Xi'an) increased while the rainfall decreased during the growing seasons. The temperature distributed from high in Baoji to low in Wugong and intermediate in Xi'an, and the rate of temperature increase was 0.20, 0.12° C $\cdot 10a^{-1}$, and 0.09° C $\cdot 10a^{-1}$. The decreases of rainfall in Xi'an, Baoji, and Wugong were 3.59, 3.23 mm, and 2.64 mm $10a^{-1}$. The AquaCrop model had good applicability in Guanzhong and simulated the yield, water utili-

收稿日期:2019-03-22 修回日期:2019-04-29

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51709233);国家"863"计划项目(2013AA102904)

作者简介:董文俊(1994-),女,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: 13259770969@163.com

通信作者:冯浩,研究员,博士生导师,主要研究方向为农业水土资源利用与保护。E-mail: nercwsi@ vip.sina.com

zation, and dynamics of crop growth of wheat and maize under mulching. The root mean square error (*RMSE*) between simulated and measured canopy coverage values ranged from 1.1% to 15.3%, the *RMSE* of biomass values ranged from 0.626 t \cdot hm⁻² to 2.540 t \cdot hm⁻², and the *RMSE* of soil water storage values ranged from 12.6 mm to 47.4 mm. The simulation results showed that temperature was rising since the 1960's. The growth of summer maize during the growing seasons in Wugong, Baoji, and Xi' an showed a decreasing trend with the reduction as high as 2.76,4.82 d \cdot 10a⁻¹, and 5.94 d \cdot 10a⁻¹, especially, since the 1980's. The yield with mulching was higher than that with control, and its coefficient of variation was small under different precipitation year types. Also, the mulching helped obtaining the grain yield and it promoted yield compared with the control under drought climate. Additionally, the mulching effectively reduced the evaporation of soil surface layer during maize seedling stage and conserved more rainfall in soil, which is needed for maize growth in later stage (an average reduction of 7.6 mm). Although mulching increased soil water consumption, it effectively improved water use efficiency of maize by conserving soil water and stabilizing crop yield. The mulching on summer maize in Guanzhong can adapt to climate change effectively and deal with drought climate to a certain extent, it has a good effect of increasing production and stabilizing production.

Keywords: AquaCrop model; global warming; winter wheat-summer maize mulching rotation; crop yield; e-vapotranspiration

全球气候变化持续发展,使得气温不断升高, 降水时空分布变异增加,极端干旱频发,诸多因子 变化均对农业生产提出严峻挑战。IPCC 报告也指 出,受气候变化的影响,干旱风险有不断增加的趋 势^[1]。我国黄土高原地区生态环境脆弱,有效降雨 少,降雨量年际波动大,时空分布差异尤为显著。 该地区农业生产对气候变化的适应能力较弱,受全 球变暖的影响更加突出。

关中地区位于黄土高原南部,是我国粮食重要 产区。玉米作为陕西省主要种植作物之一,其常年 播种面积达 100 万 hm²,占陕西省粮食总面积的 1/4,占粮食总产量的 1/3 以上^[2],其中关中地区玉 米产量约占陕西全省玉米产量的 70%^[3]。近 50 年 的观测数据表明,关中地区年平均气温不断升高, 降雨量逐年减少,"暖干"的气候趋势明显^[4];相关 研究也表明,关中地区极端天气事件增多,夏季反 常高温,旱灾频繁,洪涝灾害加剧^[5]。面对剧烈的 气候变化,关中地区急需采取有效措施稳定当地玉 米产量。因此,针对关中地区当地气候变化的特 征,研究制定应对气候变化的措施,对于稳定和增 加玉米产量,保证当地粮食安全具有重要意义。

地膜覆盖是一种既能有效改善土壤水热条件, 又能稳定并提高作物产量的重要农艺措施。随着 该措施大面积推广,我国已经逐渐成为世界上地膜 覆盖栽培作物面积最大的国家^[6]。多个地区的生 产实践证明,覆膜措施能获得较高的经济效益,增产 幅度达 30%~60%,投入产出比1:2.5~1:3.0^[7]。 覆膜措施已经在黄土高原地区广泛应用。与裸地 处理相比较,该措施可以加强作物对深层土壤水分 利用,增加作物产量^[8],提高全生育期表层土壤含 水率^[9],有助于提升水分利用效率^[10]。虽然前人对 覆膜措施进行了大量研究,但前人的试验中多数存 在覆膜措施研究历时较短,缺乏长期研究的问题。

作物模型为长期气候条件下的模拟研究提供 了较好的途径。AquaCrop 模型是由世界粮农组织 (Food and Agriculture Organization, FAO)于 2009 年 提出的,其较好地考虑覆膜对土壤水分的影响。该 模型操作简单,使用广泛,适用性较好。国内外已 经利用 AquaCrop 模型对不同作物进行了大量研究, 将它应用于模拟不同的灌溉制度对作物生长的影 响[11],模拟覆盖条件下的作物生长发育、水分动态 变化和产量^[12-13]等指标。AquaCrop 模型在黄土高 原也有少量应用, AquaCrop 模型可以较好地模拟关 中地区覆膜条件下冬小麦生长动态[12],也能够较好 地模拟全膜双垄沟栽培模式下春玉米的生长动 态^[14]。然而,前人对 AquaCrop 模型的应用多集中 在单作作物,对于冬小麦-夏玉米轮作系统的研究 较少; AquaCrop 模型能否模拟连续覆膜条件下小麦 -玉米轮作系统的产量和水分利用情况有待深入探 讨。前人针对地区气候变化的应对策略已经进行 部分研究,作物模型已经广泛应用于气候变化对作 物产量长期效应的评估方面。但是,前人利用作物 模型模拟预测覆膜措施应对气候变化的研究鲜有 报道。覆膜条件下作物虽然高产,但是其生长过程 往往伴随着高耗水[15-16],长期历史气候条件下,覆 膜玉米能否满足既能高产,又能实现土壤水分可持 续利用,以及干旱年份覆膜能否提高产量,是一个 亟待解决的重要问题。

鉴于以上研究现状和存在的问题,本文拟利用 三年连续覆膜条件下冬小麦-夏玉米轮作试验对 AquaCrop模型进行校准和验证;结合关中地区三个 气象站点(武功、宝鸡和西安)的多年历史气象数据, 模拟研究覆膜条件下夏玉米生长和水分利用对当地 气候变化的响应;基于作物产量指标和水分利用对当地 气候变化的响应;基于作物产量指标和水分利用情况 深入分析覆膜措施对气候变化的应对效果,分析其可 行性。本研究拟为玉米覆膜旱作栽培措施在关中地 区的推广和应用提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013年10月—2016年6月在陕西省杨 凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重 点实验室灌溉试验站(108°24′E,34°20′N,海拔521 m)进行。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气 候区,位于关中平原,四季分明,降雨量年际分布不 均,多年平均降雨量在630 mm 左右,主要集中在 7-10月份,无霜期 213 d。供试土壤为中壤土,土 壤基础理化指标:0~1 m 土层的平均田间持水率为 23%(质量含水率),凋萎含水率为 8.5%(质量含水 率),pH8.2,容重、有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷 和速效钾分别为 1.37 g·cm⁻³,8.14 g·kg⁻¹,0.95 g·kg⁻¹,0.83 g·kg⁻¹,20.42 g·kg⁻¹,21 mg·kg⁻¹和 290 mg·kg⁻¹。该站地下水埋深 5 m 以下,其向上 补给水量可忽略不计。

1.2 试验设计

试验设置两种处理措施:裸地不覆盖(CK)和透明地膜覆盖(PM)。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5m×2m,小区周围有0.5m的保护行。播种前先进行人工翻耕、整地和施肥,所用地膜为普通聚乙烯塑料薄膜,膜厚0.01mm。其中冬小麦采用条播种植,雨养,深度为5~6 cm,行距30 cm,返青前统一追肥30 kg · N · hm⁻²(尿素)。夏玉米采用穴播种植,雨养,深度为5~6 cm,行距60 cm,株距40 cm(表1)。

表 1 冬小麦-夏玉米田间试验 Table 1 Field experiment of winter wheat-summer maize

年份 Year	作物 Crop	品种 Cultivar	N 肥用量 N application rate ∕(kg・hm ⁻²)	P 肥用量 P application rate ∕(kg • hm ⁻²)	播种时间 Sowing date (Y-m-d)	播种量 Seeding density	收获时间 Harvest time (Y-m-d)
2013-2014	冬小麦 Winter-wheat	小偃 22 Xiaoyan 22	120	100	2013-10-09	187.5 kg \cdot hm ⁻²	2014-06-05
2014	夏玉米 Summer-maize	秦龙 14 Qinlong 14	225	90	2014-06-16	52000 株 • hm ⁻² 52000 plant • hm ⁻²	2014-10-10
2014-2015	冬小麦 Winter-wheat	小偃 22 Xiaoyan 22	120	100	2014-10-15	187.5 kg \cdot hm ⁻²	2015-06-06
2015	夏玉米 Summer-maize	秦龙 11 Qinlong 11	225	90	2015-06-12	52000 株 • hm ⁻² 52000 plant • hm ⁻²	2015-10-07
2015-2016	冬小麦 Winter-wheat	小偃 22 Xiaoyan 22	120	100	2015-10-13	187.5 kg \cdot hm ⁻²	2016-06-05
2016	夏玉米 Summer-maize	秦龙 11 Qinlong 11	225	90	2016-06-10	52000 株 • hm ⁻² 52000 plant • hm ⁻²	2016-09-23

1.3 AquaCrop 模型原理

作物对水分亏缺反应较为复杂,定量分析二者 之间的关系十分困难。实践中采用经验生产函数 公式来评价作物产量和水分响应之间的关系,它的 理论基础基于以下产量水分响应关系式^[17]:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \tag{1}$$

式中, Y_x 为作物最大产量(kg·m⁻²); Y_a 为作物实际 产量(kg·m⁻²); ET_x 为作物生长过程中最大蒸散量 (mm); ET_a 为作物实际蒸散量(mm); K_y 为作物相 对产量与相对蒸散量之间的关系系数。

上述公式一定程度上混淆了土壤的无效蒸发 和作物腾发,导致误差增大。AquaCrop 模型是在 FAO模型修订的基础上产生的一种新模型^[18],在这方面做了改进,然后利用蒸腾量与归一化水分生产效率计算地上生物量,再通过收获指数控制最终产量。优化后的公式构成了模型核心方程(2)和(3)^[19-20]:

$$B = WP^* \times \sum Tr \tag{2}$$

$$Y = HI \times B \tag{3}$$

式中,B为地上部生物量(kg·m⁻²); WP^* 为归一化 水分生产效率,根据不同水分生产效率对 CO₂ 浓度 进行归一化而得到;Y为作物产量(kg·m⁻²);HI为 作物收获指数(%);Tr为实际蒸腾量(mm)。

1.4 模型所需试验指标测定

1.4.1 土壤剖面水分 120 cm 土层土壤剖面含水

率用 TRIME - TDR (TRIME - PICO - IPH TDR,德国 IMKO 公司)测定,冬小麦每 10 d 测定一次,夏玉米 每 7 d 测定一次。TRIME 管分布在小区中间位置, 测定深度分别为 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、 100 cm 和 120 cm。

土壤贮水量(SWC,mm)计算如下:

$$SWC = 10 \times \rho_i \times \omega_i \times h_i \tag{4}$$

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)和水分利用效率(WUE, kg·hm⁻²·mm⁻¹)计算如下:

$$ET = (W_1 - W_2) + P$$
 (5)

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{6}$$

式中, W_1 为播前0~120 cm 土层土壤贮水量(mm); W_2 为收获时0~120 cm 土层土壤贮水量(mm);P为作物生育期 ≥ 5 mm 有效降雨量(mm);Y 为作物 籽粒产量(kg·hm⁻²)。

1.4.2 作物生长指标 叶面积指数(LAI)及冠层覆 盖度(CC):待冬小麦返青后,采用冠层分析仪(Sun-Scan,英国 Delta T 仪器公司)测定各生育期叶面积 指数,每个小区选取3行进行测定,取其平均值作为 结果。待夏玉米三叶期后定苗并挂牌定株,每个小区 选取具有代表性的5株植株,于关键生育期(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。

单株叶面积(*A*,m²)、叶面积指数(*LAI*)和冠层 覆盖度(*CC*)计算公式如下^[21-22]:

$$A = \sum_{k=1}^{n} 0.75 \times L_{k} \times W_{k}$$
(7)

$$LAI = 0.0001 \times \rho \times A \tag{8}$$

$$CC_{\rm hg} = 1 - \exp(-0.65LAI)$$
 (9)

 $CC_{\pm *} = 1.005 [1 - \exp(-0.6LAI)]^{1.2}$ (10) 式中, L_k 为第 k 片叶片叶底部到叶尖端的长度(m); W_k 为第 k 片叶片最宽处的宽度(m);0.75 为与叶片 形状有关的叶面积系数;公式(9) 为小麦 CC 计算公 式,公式(10) 为玉米 CC 计算公式。

地上部生物量及产量:在作物关键生育期(拔 节期、抽雄期、开花期、灌浆期和收获期),各选取5 株具有代表性的植株,齐地切断得完整植株(夏玉 米需将茎、叶和穗分开),立即带入实验室称重并置 于烘箱杀青30min(105℃),烘干(75℃)至恒重,记 录干物质重量。冬小麦成熟后,在每个小区取单位 面积植株,测定株高、百粒重等产量性状,并将麦穗 人工脱粒烘干,测定籽粒产量并换算成公顷产量 (kg・hm⁻²)。夏玉米成熟后,每个小区选取中间两 行植株,测定百粒重和果穗长等产量性状,风干后 称总重量,并换算成公顷产量(kg・hm⁻²)。

1.5 模型输入参数

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,其中部分参数由试验实测值确定,其余参数采用模型中的经验值,并根据实测值进行修正校准。本研究利用三年田间观测数据建立模型数据库,由PM处理试验数据率定模型,CK处理试验数据对模型和参数进行验证。首先利用2014—2015年试验数据对PM处理参数进行校准,利用2013—2014年和2015—2016年试验数据进行PM处理的验证;然后基于PM处理的参数,将CK处理地膜覆盖度设为0,从而统一CK处理与PM处理的参数,对CK处理参数进行微调;利用2014—2015年CK处理试验数据对模型参数进行校准,利用2013—2014年和2015—2016年试验数据对CK处理进行验证。

地膜覆盖对作物生长发育及生育期天数具有 增温效应^[12],而 AquaCrop 模型忽略了温度的影响, 故本研究将覆膜与裸地处理分别设定参数(表 3)。

1.6 模型的校准、验证和评价指标

冠层覆盖度(CC)是 AquaCrop 模型中反映作物 生长发育状况的重要参数,LAI 与 CC 呈正相关,叶 面积指数用冠层覆盖度(CC)来代替,能清晰表现作 物的生长状况,所以首先进行作物冠层生长的调 试。在模型中输入气象资料、作物参数和田间管理 等初始条件后,通过调整作物生育期和最大冠层覆 盖度及土壤水分原始条件等参数来进行模拟冠层 覆盖度,与由叶面积指数转换的实测冠层覆盖度进 行对比校正。在冠层模拟较好的情况下,保持冠层 参数不变,通过调整土壤水分原始条件和最大根深

表 2 土壤初始参数

Table 2 Initial soil parameters

土层 Soil layer /cm	田间持水量 Field capacity /(cm ³ ・cm ⁻³)/	凋萎系数 Permanent wilting point ((cm ³ ・cm ⁻³)	饱和含水量 Saturated soil water content)/(cm ³ ・cm ⁻³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity /(mm・d ⁻¹)
0~20	31.0	21.4	41.5	353.0
$20 \sim 40$	32.5	21.8	41.5	256.8
$40 \sim 60$	34.5	22.0	42.3	300.6
$60 \sim 80$	33.5	20.0	46.8	305.0
80~120	30.7	14.1	44.8	292.0

表 3 AquaCrop 模型中的作物参数

Table 3 Crop parameters in AquaCrop model

会教/世社 Demonstria Januaria	小麦	Wheat	玉米 Maize	
参数抽还 Parametric description	СК	PM	СК	PM
基底温度 Base temperature/℃	0	0	8	8
上限温度 Upper temperature/℃	26	26	30	30
授粉开始失效时的最低空气温度 Minimum air temperature at beining of pollination failure/℃	5	5	5	5
授粉开始失效时的最高空气温度 Maximum air temperature at begining of pollination failure/℃	35	35	35	35
冠层扩展上限阈值 Upper threshold for canopy expansion/(% of TAW)	0.25	0.25	0.25	0.25
冠层扩展下限阈值 Lower threshold for canopy expansion/(% of TAW)	0.6	0.6	0.68	0.68
叶片扩展胁迫系数的曲线形状 Leaf expansion stress coefficient curve shape	2	2	3	3
气孔关闭上限阈值 Upper threshold for stomatal closure/(% of TAW)	0.68	0.68	0.72	0.72
冠层衰老胁迫系数 Canopy senescence stress coefficient/(% of TAW)	0.7	0.7	0.68	0.68
根区扩展的形状因子 Shape factor describing root zone expansion	1.5	1.5	1.5	1.5
开花期水分胁迫的上限阈值 Upper threshold for water stress during flowering/(% of TAW)	0.85	0.85	0.85	0.85
播种~出苗的有效积温 Effective accumulated temperature from sowing to emergence/(℃・d)	150	103	130	110
播种~最大冠层覆盖度的有效积温 Effective accumulated temperature from sowing to maximum canopy cover/(℃・d)	1720	1500	830	825
播种~最大根深的有效积温 Effective accumulated temperature form sowing to maximum rooting depth/(℃・d)	1501	1444	1452	1440
播种~冠层衰老的有效积温 Effective accumulated temperature from sowing to start senescence/(℃・d)	1900	1950	1524	1500
播种~成熟的有效积温 Effective accumulated temperature from sowing to maturity/(℃・d)	2190	2190	1750	1750
播种~开花的有效积温 Effective accumulated temperature from sowing to flowering/(℃・d)	1406	1349	1044	1020
授粉期持续时间的有效积温 Effective accumulated temperature of pollination/(℃・d)	722	779	672	670
经济产量持续时间的有效积温 Effective accumulated temperature of building up harvest index/(℃・d)	646	304	180	180
最大根深 Maximum effective rooting depth/m	1.7	1.7	1.7	1.7
最小根深 Minimum effective rooting depth/m	0.3	0.3	0.3	0.3
水分生产力 Water productivity,WP*/(g・cm ⁻²)	21	21	36	36
参考收获指数 Reference harvest index/%	39	39	46	46
地表覆盖类型 Type of surface mulches	裸地 Non- mulching	塑料地膜 Plastic mulches	裸地 Non- mulching	塑料地膜 Plastic mulches

注:CK-裸地处理;PM-覆盖处理;TAW-总的根区土壤有效水。

Note: CK-non-mulching treatments; PM-mulching treatments; TAW-total available soil water content in the root zone.

获指数,对作物产量进行模拟,通过与实测产量进行对比,对收获指数和产量形成期各因素影响程度进行校正。冠层覆盖度、生物量和土壤贮水量评价指标为均方根误差(RMSE)、标准均方根误差(NRMSE)和决定系数(R²),产量以及耗水量评价指标为相对误差(RE)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i - s_i)^2}{n}}$$
(11)

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i - s_i)^2}{n}}}{\frac{m}{m}}$$
(12)

$$R^{2} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n} (m_{i} - \overline{m})(s_{i} - \overline{s})\right]^{2}}{\sum_{i=1}^{n} (m_{i} - \overline{m})^{2} \sum_{i=1}^{n} (s_{i} - \overline{s})^{2}}$$
(13)

$$RE = \frac{s_i - m_i}{m} \times 100 \tag{14}$$

式(11)~(14)中,*s_i*为模拟值,*m_i*为观测值,*s*为模 拟值的平均值;*m*为实测值的平均值;*n*为实测值与 观测值的个数;*RMSE*为均方根误差,越接近于0表 明模拟值与实测值越相近;*NRMSE*为标准均方根误 差,越小表示模拟准确可靠,*NRMSE*<10%模拟效 果很好,10% < *NRMSE* < 20%表明模拟效果好, 20% < *NRMSE* < 30%表明模拟效果合理,*NRMSE* > 30%表明模拟效果差^[23];*R*²为决定系数,越接近 于1表明模拟值与实测值一致性越高;*RE*为相对误 差,本研究以15%为标准,越小表示模拟越好。

1.7 数据处理

选取关中地区武功、宝鸡、西安(表4)3个地区 作为典型旱地覆膜夏玉米研究区域。基于过去50 a 历史气象数据,利用经过校准和验证的 AquaCrop 模 型模拟研究覆膜夏玉米的生长在长时间序列气候 条件下的变化规律;研究覆膜夏玉米产量、耗水量 和1.2 m 土层土壤贮水量对气候变化的响应规律。 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,其它条件 与校准和验证一致,所需气象资料从中国气象数据 网获取。

该试验首先根据干旱指数(drought index, DI) 将近 50 a 夏玉米生育期内降水(6月10日至9月 30日)划分为丰水年(DI≥0.35)、平水年(-0.35<DI

式中, P 为夏玉米生育期内降水量(mm); M 为近 50 a 夏玉米生育期内平均降水量(mm); σ 为近 50 a 夏 玉米生育期内降水量的标准差。

本研究利用 EXCEL2010 对数据进行预处理,用 SPSS 20.0 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 作图。

	表 4 关中地区降雨基本信息	
Table 4	Basic information for precipitation in Guanzhong ar	ea

地点 Site I		经度 Longitude/°	年均降雨量 Annual average rainfall/mm	年均气温	小麦生育期 Wh	eat growth season	玉米生育期 Maize growth season	
	纬度			Annual average	年均降雨	年均气温	年均降雨	年均气温
	Latitude/°			temperature ∕℃	Average annual	Average annual	Average annual	Average annual
					rainfall/mm	temperature/°C	rainfall/mm	temperature/℃
武功 Wugong	34.28	108.22	304.47	16.25	246.18	9.04	362.76	23.45
宝鸡 Baoji	34.38	107.15	329.37	16.09	254.80	9.16	403.94	23.03
西安 Xi'an	34.27	108.95	276.06	16.32	236.35	8.92	315.77	23.71

注:年均值指历史气象数据平均值,武功为1956-2012年,宝鸡为1956-2007年,西安为1956-2007年。

Note: The average annual values were the average values of historical meteorological data from 1956 to 2012 for Wugong, from 1956 to 2007 for Baoji, and from 1956 to 2007 for Xi'an.

2 结果与分析

2.1 玉米旱作覆膜措施下 AquaCrop 模型的校准和 验证

在冬小麦及夏玉米生长过程中,冠层覆盖度 (CC)变化趋势随玉米和小麦生育期发展而呈现单 峰曲线变化(图1)。CC在作物拔节期迅速增加,在 灌浆期达到峰值,之后随着叶片的衰老缓慢减小。 AquaCrop模型校准过程中,CC的模拟值与实测值 变化趋势基本一致(图1),其*R*²在0.25~0.97之间, *RMSE*分布在1.1%~15.3%之间,*NRMSE*分布在 1.6%~22.6%之间,且50.8%的冠层覆盖度模拟值在 实测值及标准差范围内波动,说明模型已经具备较 好的校准结果。在 AquaCrop模型验证过程中,CC 也表现出了较好的模拟结果,模拟值和实测值之间 的*R*²值分布在0.22~0.92之间,*RMSE*分布在7.8% ~11.4%之间,*NRMSE*分布在12.5%~24.9%之间。 比较发现,本研究校准和验证之后的模拟效果与杨 宁等^[25]校准结果相似。

地上部生物量在 AquaCrop 模型中是决定作物 产量的主要参数之一。图 2 可以看出,地上部生物 量模拟值和实测值变化趋势基本一致, AquaCrop 模 型校准过程中,地上部生物量模拟值和实测值之间 的 R²分布在 0.89~0.98 之间, RMSE 分布在 0.626~ 2.184 t · hm⁻²之间, NRMSE 分布在 10.8% ~ 29.5% 之间, 且 63.6%的地上部生物量模拟值在实测值及 标准差范围内波动。在 AquaCrop 模型验证过程中, 生物量也表现出了较好的模拟结果, 地上部生物量 模拟值和实测值之间的 R²值分布在0.96~0.98 之间, RMSE 分布在 0.664~2.540 t · hm⁻²之间, NRMSE 分布 在 19.8%~50.4%之间。滕晓伟等^[26]研究结果 RMSE 为 1.622 t · hm⁻², HSIAO 等^[27]研究结果 RMSE 在0.58 ~6.18 t · hm⁻²之间, 与本研究结果相近。

在 AquaCrop 模型校准过程中,土壤贮水量模拟 趋势线中 67.0%在实测值的标准差波动(图 3)。土 壤贮水量模拟值和实测值之间的 R²分布在 0.10~ 0.94之间, RMSE 分布在 14.3~28.9 mm 之间, NRMSE 分布在 4.5%~9.6%之间。在 AquaCrop 模 型验证过程中,土壤贮水量也表现出了较好的模拟 结果,土壤贮水量模拟值和实测值之间 R²分布在0.05 ~0.90之间, RMSE 分布在 14.2~47.4 mm 之间, NRMSE 分布在 3.7%~17.7%之间(表 5)。李子忠等^[28]研究结 果表明 RMSE 分布在 19.4~24.9 mm 之间。

AquaCrop 模型校准过程中,产量模拟值和实测 值之间的 RE 分布在-15.4%~9.6%之间,这与以往 结果相近,如杨宁等^[25]的研究结果为-1%<RE< 15%。作物生育期耗水量模拟值和实测值之间的 RE 分布在-24.7%~11.1%之间(表6)。



图 1 2013—2016 年覆膜与裸地处理下冠层覆盖度模拟和实测结果

Fig.1 Simulated and measured canopy covervalues under plastic mulching and non-mulching treatments from 2013 to 2016







2.2 气候变化对夏玉米生育期的影响

随着时间发展,关中地区夏玉米生育期内年降 水量的阶段性特征明显(图4)。武功、宝鸡和西安 地区降雨量从 20 世纪 50 年代至 70 年代末表现出 微弱减少趋势,在 1980—2000 年均表现出明显的减 少趋势,在 2000 年之后呈现波动稳定状态。整体上 3 个地区降雨量呈减小趋势。减少幅度大小依次为 西安、宝鸡和武功,减小量分别为 3.59、3.23 mm・ 10a⁻¹和 2.64 mm・10a⁻¹。

武功、宝鸡和西安地区年平均温度均随着时间的推移呈增加趋势,温度增加幅度由高到低依次为 宝鸡、西安和武功,增温速率分别为0.20、0.12 ℃・



图 3 2013—2016 年復誤与保地处理下 1.2 m 工层工壤贮水重模拟和头测结苯 Fig.3 Simulated and measured soil water content in 1.2 m depth under plastic mulching and non-mulching treatments from 2013 to 2016

10a⁻¹和 0.09 ℃ · 10a⁻¹;特别是 1980s 以来,三个地 区增温趋势更加显著,增温速率达 0.54、0.67℃ · 10a⁻¹和 0.21℃ · 10a⁻¹。

受气温升高影响,夏玉米的生育期天数呈现减 少趋势,减少幅度由高到低为宝鸡、西安和武功,减 小量分别为2.74、1.66 d · 10a⁻¹和1.35 d · 10a⁻¹,特 别是1980s 以来,3 个地区夏玉米生育期也显著减 小,减小量达4.82、5.94 d · 10a⁻¹和2.78 d · 10a⁻¹。

2.3 气候变化对夏玉米产量、耗水量、水分利用效

率和 1.2 m 土层土壤贮水量的影响

覆膜玉米在不同降雨年型中均能保持较高产 量(图 5a、5b 和 5c)。在干旱年,武功、宝鸡和西安 地区 PM 处理产量分别为 7 920.6、7 443.9 kg · hm⁻² 和 7 096.2 kg · hm⁻², CK 处理的产量分别为 2 486.3、2 767.4 kg · hm⁻²和 2 820.4 kg · hm⁻², 增产 率分别为 218.6%、169.0% 和 151.6%。在平水年武 功、宝鸡和西安地区 PM 处理产量分别为 8 835.7、 6 523.2 kg · hm⁻²和 7 619.4 kg · hm⁻², CK 处理的产 量分别为4 394.2、4 221.9 kg · hm⁻²和4 514.9 kg · hm⁻², 增产率分别为 101.1%、54.5%和 68.8%。在丰 水年武功、宝鸡和西安地区 PM 处理产量分别为 9 140.7 7 176.5 kg · hm⁻² 和 7 917.6 kg · hm⁻², CK 处理的产量分别为 5 060.2、3 717.9 kg · hm⁻² 和 5 969.5 kg · hm⁻², 增产率分别为 80.6%、93.0% 和 32.6%。前人研究表明覆膜使春玉米田蒸散和棵间 蒸发降低达 6.0% 和 57.7%, 经济产量和生物产量分 别增加23.7%和15.1%,水分利用效率提高22.6%^[29]。 表 5 2013-2016 年 1.2 m 土层土壤贮水量模拟评价结果

Table 5 Evaluation results for simulated soil water content

in 1.2 m depth from 2013 to 2016

年份 Year	作物 Crop	处理 Treatment	决定 系数 <i>R</i> ²	均方根 误差 <i>RMSE/</i> mm	相对均方 根误差 NRMSE/%
2012 2014	冬小麦	PM	0.86	20.4	6.3
2013-2014	Winter-wheat	CK	0.79	22.2	6.8
	夏玉米	PM	0.73	23.7	23.7
2014	Summer-maize	СК	0.90	20.5	6.6
	冬小麦	РМ	0.63	22.7	7.0
2014-2015	Winter-wheat	СК	0.55	12.6	3.7
	夏玉米	РМ	0.10	28.9	9.6
2015	Summer-maize	СК	0.05	36.6	11.6
2015-2016	冬小麦	РМ	0.94	14.3	4.5
	Winter-wheat	СК	0.89	14.2	4.3
2016	夏玉米 Summer-maize	PM CK	0.80 0.79	14.9 47 4	5.5 17.7
	Summer-marze	GIL	0.17		- / • /

在干旱年,武功、宝鸡和西安地区 PM 处理产量 变异系数分别为 16.3%、19.3%和 25.4%,CK 处理产 量变异系数分别为 79.2%、101.4%和 78.5%。在平 水年,武功、宝鸡和西安地区 PM 处理产量变异系数 分别为 9.5%、35.5%和 19.7%,CK 处理产量变异系 数分别为 48.4%、58.5%和 52.1%。在丰水年,武功、 宝鸡和西安地区 PM 处理产量变异系数分别为 10.3%、26.9%和 7.9%,CK 处理产量变异系数分别 为 50.3%、58.1%和 18.5%。PM 处理产量变异系数 小于 CK 处理,是因为覆膜处理对降雨具有调节和

表 6 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

Table 6 Measured and simulated values for winter wheat-summer maize rotation system yield and water consumption from 2013-2016

		-	•	•				
ケル	11- Wa	61 m	产量 Yield			耗水量 Weter consumption/mm		
平份 Year	7戶初 Crop	处理 Treatment	实测值	, · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	RE		模拟值	RE
			Measured value	Simulated value	/%	Measured value	Simulated value	/%
2012 2014	冬小麦	СК	5458.7±1113.4a	4626	-15.2	-	325.3	-
2013-2014	Winter-wheat	PM	$6921.9 {\pm} 648.9 {\rm b}$	6931	0.1	-	351.6	-
2014	夏玉米	CK	3715.2±896.8a	3987	7.3	328.2a	342.3	4.3
2014	Summer-maize	PM	$4551.2{\pm}2062.2{\rm b}$	3851	-15.4	308.2a	316.2	2.6
2014 2015	冬小麦	CK	5195.5±1219.2a	4569	-12.1	275.2a	305.8	11.1
2014-2013	Winter-wheat	PM	$7400.9 \pm 511.6 \mathrm{b}$	6767	-8.5	286.9a	332.5	15.9
2015	夏玉米	CK	5054.1±1743.8a	4532	-10.3	294.3a	221.5	-24.7
2013	Summer-maize	PM	$6673.5{\pm}790.4~{\rm b}$	6337	-5.0	276.1a	232.2	-15.9
2015-2016	冬小麦	CK	2752.0±1425.3a	2340	-14.9	248.6a	224.7	-9.6
2015-2016	Winter-wheat	PM	$5619.1 \pm 691.4 \mathrm{b}$	5559	-1.6	226.3a	262.5	15.9
2016	夏玉米	CK	4986.8±1883.9a	4665	-6.4	236.8a	261.8	10.6
	Summer-maize	PM	$6153.3 \pm 2451.2 \mathrm{b}$	6748	9.6	241.9a	239.5	-1.0

注:同一列数值后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different letters in same column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.



图 4 夏玉米生育期内降雨和温度的变化及生长周期对气候变化的响应



climate change during summer maize growth seasons

分配的作用,可抑制土壤水分蒸发,进而提高水分 利用效率,促进旱地作物高产稳产^[30-31]。与张俊鹏 等^[32]研究华北地膜覆盖提高夏玉米的灌浆速率、产 量的结果一致。

近 50 年来,武功和西安地区夏玉米 PM 处理产 量均呈上升趋势, PM 产量增加幅度由大到小依次 为西安、武功,增加量分别为 129.89、91.53 kg・hm⁻² 10a⁻¹,西安和武功 CK 产量增加 233.44、445.43 kg
hm⁻² · 10a⁻¹;而宝鸡 PM 产量呈减少趋势,减少量为 132.17 kg · hm⁻² · 10a⁻¹,CK 呈上升趋势,增加量为 251.15 kg · hm⁻² · 10a⁻¹。宝鸡地区 PM 产量呈减小趋势,可能与降雨量和温度波动较大有关。由表4可知,近50 年宝鸡地区年均降雨量高于其他两个地区,在降水量较高的地区,PM 处理不会带来显





Fig.5 Response of summer maize grain yield, soil water consumption, water use efficiency, and soil water content at 1.2 m depth to climate change

著的增产效果^[33]。另一方面温度是影响玉米生长 发育的重要生态因子,温度变化会影响玉米生长速 度、叶面积指数、干物质量和产量。由图4可知,温 度增加幅度由高到低依次为宝鸡、西安和武功,增 温速率分别为 0.20、0.12 ℃ · 10a⁻¹ 和 0.09 ℃ · 10a⁻¹,最高温变异系数由大到小依次为宝鸡、西安 和武功,变异系数分别为3.69%,3.51%和3.44%。 夏玉米年均温度由大到小依次为西安、武功和宝 鸡,年均温度分别为23.71℃、23.45℃和23.03℃(表 4)。总体来说,宝鸡地区温度波动较大,而在关键 生育期温度过高不利于干物质的积累和运输^[34],低 温会造成有效积温不足,导致授粉困难,灌浆期延 长,干物质积累缓慢,造成减产^[35]。宝鸡 PM 产量 呈减少趋势,而CK呈上升趋势,是因为灌浆成熟期 日温度高于25℃不利于干物质的积累和运输,地膜 覆盖可以显著提高土壤温度,与气候变化背景下的 温度不断升高产生叠加作用, 使温度高于 CK 处理, 产生负效应,所以影响了玉米的灌浆及干物质积 累,导致产量呈减少趋势。而 CK 处理温度处于玉 米生长正常范围,所以呈上升趋势。

宝鸡和西安 PM 处理耗水量均呈上升趋势,耗水量增加幅度由大到小依次为宝鸡和西安,变化量分别为 5.74、3.85 mm · 10a⁻¹,武功呈下降趋势,变化量为 0.24 mm · 10a⁻¹。CK 处理武功和宝鸡耗水量均呈减小趋势,变化量为 3.33、0.66 mm · 10a⁻¹, 西安呈上升趋势,变化量为 3.70 mm · 10a⁻¹,且 PM 耗水量高于 CK 处理。

在武功和西安地区,夏玉米水分利用效率总体 均呈上升趋势,PM 处理的增加速率分别为 0.20、 0.14 kg · hm⁻² · mm⁻¹ · 10a⁻¹,而 CK 处理的水分利 用效率增加率为 1.12、0.50 kg · hm⁻² · mm⁻¹ · 10a⁻¹。 在宝鸡地区,PM 处理水分利用效率呈减少趋势,减少 率为 0.61 kg · hm⁻² · mm⁻¹ · 10a⁻¹;CK 处理的水分利 用效率呈上升趋势,增加量为 0.61 kg · hm⁻² · mm⁻¹ · 10a⁻¹。

1.2 m 土层土壤贮水量 PM 与 CK 处理均呈下

降趋势,PM 土壤贮水量减少幅度由大到小依次为 宝鸡、西安和武功,减小量为 9.04、7.62 mm · 10a⁻¹ 和 5.83 mm · 10a⁻¹,CK 处理土壤贮水量减少幅度由 大到小依次为西安、宝鸡、武功,减小量为 7.59、4.93 mm · 10a⁻¹和 0.68 mm · 10a⁻¹。

3 讨 论

3.1 AquaCrop 模型在关中地区的适用性

前人对 AquaCrop 模型在关中地区的适用性已 经进行了初步研究。杨宁等^[25]通过对 AquaCrop 模 型模拟覆膜栽培玉米水分利用与产量形成过程进 行研究,发现 AquaCrop 模型可以较好地模拟覆膜玉 米的冠层覆盖度和土壤贮水量。刘匣等[12]验证了 AquaCrop 模型在关中地区覆膜冬小麦生长发育和 产量形成的适用性,为 AquaCrop 模型用于覆膜条件 下作物生产力的模拟和预测提供了较好的参数支 持。张卫华等^[36]对 AquaCrop 模型在黄土高原地区 夏玉米生长和农田水分的适用性进行了评价,发现 在无水分胁迫条件下, AquaCrop 模型可以用于对夏 玉米的贮水量及产量的模拟。本研究基于3a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和水分利用的效果 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生长动态、作物的 产量和土壤贮水量的变化。

在模拟覆膜条件下冬小麦-夏玉米轮作系统生 长过程中,拔节前地上部生物量和 CC 模拟效果较 差,原因可能是模型没有考虑地膜的增温效应,忽 略了土壤温度对作物生长的影响,使得模型模拟拔 节之前的小麦生长速率滞后于实际生长速率。 2015—2016年CK处理小麦生物产量模拟值偏低, 这可能是由于模型模拟的冠层覆盖度较大,使得模 型高估了小麦蒸发蒸腾量,导致土壤水分严重亏 缺,影响后期小麦生物产量。2016年玉米土壤贮水 量模拟效果不好,可能是因为该年玉米生育期降雨 少. 且从 7—9 月持续高温. 导致实际土壤蒸发较大. 作物耗水较多。但是由于模型是由 PM 处理进行校 准,模型校准过程中低估了土壤的蒸发速率,使得 土壤贮水量模拟值大于实测值。此外,玉米实际生 长过程中,由于持续高温,玉米提前成熟,冠层覆盖 度迅速减小,也加重了土壤表面蒸发。

3.2 覆膜玉米产量对干旱天气的响应

近年来,干旱和持续高温等气象灾害事件随着 全球气候变化的发展,发生频率显著增加,这些极 端气候变化会严重威胁作物的生长,容易造成作物 减产。温度的升高和降水量的降低加剧了干旱气 候对产量的负面影响。前人研究表明,干旱气候已 成为影响玉米生产的重要因素,中度干旱胁迫下耐 旱玉米产量比充分灌溉处理减少 33.7%,不耐旱玉 米则比充分灌溉处理减少 62.3%[37]。对于关中地 区,西安地区玉米干旱灾害致灾因子危险性等级相 对较高,武功和宝鸡地区为中等等级^[38],干旱胁迫 严重影响当地玉米生长发育,最终降低玉米产量。 干旱造成的玉米减产率不仅取决于干旱程度,同时 与其发生的玉米生长阶段密切相关。与干旱相对 应,关中地区的粮食产量稳定性很大程度上取决于 当地降水的稳定性。模拟研究表明,在1958、1966、 1977、1985年和1997年的玉米生长季,干旱气候使 得 CK 处理的玉米产量大幅减产,产量均低于1000 kg·hm⁻²。分析发现,武功和西安地区玉米生育前 期降雨多,而生育后期几乎没有降雨,导致田间土 壤干旱缺水,这可能大大限制了根系吸水,使得植 物无法满足籽粒灌浆需求,造成籽粒灌浆不足,而 造成减产,甚至绝产。对于宝鸡地区,玉米遭受生 育前期干旱,限制了玉米营养生长阶段的植株叶片 生长,影响其光合作用,导致干物质累积减少;即使 后期降雨较多,仍无法扭转玉米减产的结果。已有 研究表明,在干旱年份中,对照没有籽粒收获,而覆 膜处理仍然可以获得一定籽粒产量^[39]。本研究发 现类似结果,模拟研究表明,PM 处理在干旱生长 季,玉米产量均高于3 500 kg · hm⁻²,与 CK 处理相 比,PM 处理表现出了较好的稳产作用。因此,PM 处理可以有效应对关中地区干旱气候的发生,使得 作物在极端干旱天气下仍然可以达到一定产量。

3.3 玉米水分利用对覆膜处理的响应

覆膜处理可以减少土壤蒸发,提高土壤水分有效性,增强玉米抗旱性。地膜覆盖作为一层不透气的物理阻隔,减缓土壤水分蒸发量和蒸发速度,有助于增加土壤贮水量,促进作物生长发育,达到稳产增产的目的。本研究中,与CK处理平均耗水量相比,武功、宝鸡和西安地区玉米苗期PM处理平均耗水量分别减少9.1、7.3 mm和6.3 mm,其中干旱年分别减少10.2、7.8 mm和6.9 mm,平水年分别减少8.0、8.7 mm和6.0 mm,丰水年分别减少8.6、5.1 mm和6.0 mm。以上表明,覆膜处理可以有效抑制土壤表层蒸发,在土壤中保蓄更多的前期降雨,为后期玉米的生长提供必要的水分,保证后期干物质的积累和籽粒生长发育,Chen等^[15]、柴守玺等^[40]的研究成果也证明了这一结论。随着气候变化的发展,年平均降雨量呈逐年减少趋势,在此背景下,充分有

效利用降雨资源就成了保证作物生长的关键。本研究中,PM 处理在不同降雨年型下均显著提高玉米的水分利用效率。主要原因可能为 PM 处理有效抑制了无效土壤蒸发,较好地保证有效作物蒸腾,优化土壤水分的蒸发-蒸腾分配模式,缓解了干旱条件对作物生长的限制,保证了作物产量,这也是PM 处理在干旱气候条件下稳定玉米产量的主要原因。

探究干旱半干旱地区气候变化对作物生长的 影响,有助于制定适应策略应对气候变化,减轻其 对农业生产的负面影响。覆膜条件下,玉米播种期 可以提高土壤贮水量,有利于提高玉米出苗率,同 时地膜覆盖的增温保墒、调节水分的运移分配、提 高水分利用效率、控制杂草来促进作物生长的作用 均有利于提高作物产量,增产作用在干旱年份更突 出。本研究利用覆膜措施应对气候变化,效果显著。

4 结 论

本研究利用3 a 连续覆膜条件下冬小麦-夏玉 米轮作试验验证了 AquaCrop 模型在关中地区的适 用性。选取关中地区具有代表性的武功、宝鸡和西 安作为典型气象站点,利用 AquaCrop 模型模拟研究 了多年历史气候条件下夏玉米作物生长和水分利 用对覆膜措施的响应规律,探索利用覆膜措施应对 气候变化的可行性,主要得到如下结论:

1) AquaCrop 模型在关中地区具有较好的适用 性,可以较好地模拟连续覆膜条件下小麦和玉米的 产量指标、水分利用和作物生长的动态变化。

2)关中地区年平均温度随着年份的推移呈增加趋势,降雨量随着年份的推移呈减少趋势,增温导致夏玉米生长周期明显缩短。

3) 在多年历史气候条件下,夏玉米覆膜可以有 效抑制土壤表层蒸发,在土壤中保蓄更多的前期降 雨,为后期玉米的生长提供必要的水分,保证后期 干物质的积累和籽粒生长发育,达到稳产增产的 目的。

4)关中地区夏玉米覆膜可以有效应对气候变 化,尤其是应对干旱气候,具有较好地稳产效应。

参考文献:

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: Synthesis Report. Contribution of working group I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Summary for Policymakers, 2007:159-254.
- [2] 袁梁. 陕西省发展玉米产业的比较优势分析[J].陕西农业科学, 2010, 56(4): 55-56.

- [3] 胥志文,张林约,郭德龙,等.影响关中西部灌区夏玉米增产的主要 因素及持续增产措施[J].农业科技通讯,2009,(3):118-120.
- [4] 李志,赵西宁.1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析[J].自然资源学报,2013, 28(2): 287-299.
- [5] 段建军,王小利,高照良,等.黄土高原地区 50 年降水时空动态与趋势分析[J].水土保持学报,2009, 23(5):143-146.
- [6] 邢胜利,魏延安,李思训.陕西省农作物地膜栽培发展现状与展望[J].干旱地区农业研究,2002, 20(1):10-13.
- [7] 高玉红,牛俊义,闫志利,等.不同覆膜栽培方式对玉米干物质积累 及产量的影响[J].中国生态农业学报,2012, 20(4):440-446.
- [8] 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].农业机械学报,2015,46(12):184-193.
- [9] 高翔,龚道枝,顾峰雪,等.覆膜抑制土壤呼吸提高旱作春玉米产量[J].农业工程学报,2014,30(6):62-70.
- [10] 谢军红,柴强,李玲玲,等.黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J].中国农业科学,2015,48(8): 1558-1568.
- [11] Greaves G, Wang Y M. Assessment of FAO aquacrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment[J]. Water, 2016, 8(12):557.
- [12] 刘匣,丁奠元,张浩杰,等.覆膜条件下对 AquaCrop 模型冬小麦生 长动态和土壤水分模拟效果的评价分析[J].中国农业科学,2017, 50(10):1838-1851.
- [13] 刘琦. 利用 AquaCrop 模型模拟覆膜春玉米耗水和产量[J].灌溉排水学报,2015,34(6):54-61.
- [14] 张涛,孙伟,张锋伟,等.旱地全膜双垄沟玉米生产的 AquaCrop 模型模拟及管理措施优化[J].应用生态学报,2017,28(3):918-926.
- [15] Chen Y L, Liu T, Tian X H, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. Field Crops Research, 2015, 172:53-58.
- [16] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(1):101-109.
- [17] Raes D, Geerts S, Kipkorir E, et al. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(3):0-357.
- [18] Doorenbos Y, Kassam A H. Yield response to water [J]. Irrigation & Agricultural Development, 1986, 33(6):257-280.
- [19] Heng L K, Hsiao T, Evett S, et al. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):488-498.
- [20] Salemi H, Soom M M, Mousavi S F, et al. Irrigated silage maize yield and water productivity response to deficit irrigation in an arid region [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2011, 20(5): 1295-1303.
- [21] McKee, Guy W. A Coefficient for Computing Leaf Area in Hybrid Corn [J]. Agronomy Journal, 1964, 56(2):240-241.
- [22] Qi W Z, Liu H H, Liu P, et al. Morphological and physiological characteristics of corn (*Zea mays* L.) roots from cultivars with different yield potentials [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 38:54-63.