

地膜覆盖和育苗移栽技术对农作物产量和水热资源利用的影响

黄 灿^{1,2} 江 丽^{1,2} 陈 鑫^{1,2} 汪芳甜^{1,2} 安萍莉^{1,2*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193;

2. 国土资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘 要 以河北曲周为例,利用 AquaCrop 模型和指标评价法,建立了粮食作物生长环境要素(气象、土壤等)与产量之间的定量关系,并评价了地膜覆盖和育苗移栽技术下作物(冬小麦、夏玉米)对水热资源的利用效率。结果表明:1) AquaCrop 模型能较好地模拟作物(冬小麦、夏玉米)的冠层覆盖度、生物量和产量,并能分析作物种植技术对水热资源利用效率的影响;2) 地膜覆盖和育苗移栽技术显著影响作物(冬小麦、夏玉米)在播种—拔节时期的水热资源利用效率;3) 冬小麦地膜覆盖和夏玉米育苗移栽技术的水热资源利用效率分别提高 0.67 和 0.50,产量分别增加 326 和 972 kg/hm²。说明冬小麦地膜覆盖和夏玉米育苗移栽技术可以影响作物在关键生育期内对水热资源的利用以及提高作物的产量。本研究旨在为其他作物效率和理论潜力的提升提供技术支撑,研究结果可作为冬小麦和夏玉米因干旱、冻害以及播种不及时等原因受灾的一种补救技术,为曲周地区的作物种植技术调整提供参考。

关键词 地膜覆盖技术; 育苗移栽技术; 水资源; 热量资源; 利用效率

中图分类号 S318

文章编号 1007-4333(2018)12-0001-12

文献标志码 A

Research on the effects of plastic film mulching and seedling transplanting on crop yield and water and heat resource utilization

HUANG Can^{1,2}, JIANG Li^{1,2}, CHEN Xin^{1,2}, WANG Fangtian^{1,2}, AN Pingli^{1,2*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Key Laboratory of Land Quality, Ministry of Land and Resources, Beijing 100193, China)

Abstract The quantitative relationship between the environmental factors and yield of crops was established by using AquaCrop model in Quzhou County, Hebei Province. A index evaluation method was used to evaluate the utilization of water and heat resources by mulching and seedling transplanting for winter wheat and summer maize. The results showed that: Firstly, the AquaCrop model well simulated the crop canopy coverage, biomass, and yield, and could be used to analyze the impact of technology on water and heat resource use efficiency. Secondly, film mulching and seedling transplanting techniques significantly affected the utilization efficiency of water and heat resources of crops (winter wheat and summer maize) at sowing-jointing stage. Thirdly, the water and heat resource utilization efficiency of winter wheat mulching and summer maize seedling transplanting increased by 0.67 and 0.5, respectively, and the output increased by 326 kg / hm² and 972 kg / hm². The results showed that the plastic film mulching and the seedling transplanting technology affected the utilization of water and heat resources and crop yield during the critical growth period. Above results be used as a support to enhance the efficiency and theoretical potential of other crops and further serve as a remedy for the disaster of winter wheat and summer maize and provide reference for technical adjustment in

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B01); 2017 年度全国标准耕作制度更新(2017-02-03)

第一作者: 黄灿, 硕士研究生, E-mail: 1204010420@cau.edu.cn

通讯作者: 安萍莉, 教授, 主要从事土地利用规划研究, E-mail: anpl@cau.edu.cn

Quzhou County.

Keywords plastic film mulching technology; seedling transplanting technology; water resources; heat resources; utilization efficiency

冬小麦—夏玉米作为华北平原两熟区的主要种植模式,经常由于干旱、冷害以及后茬作物播种不及时等不利因素,加大其减产风险^[1]。而农业技术是解决这一问题的有效手段之一^[2],尤其是地膜覆盖技术由于能抗旱增温增产^[3-4],在我国北方旱作农区得到大面积的推广。夏玉米育苗技术因能改变作物的生育期^[5],目前在农业生产中得到广泛应用。由于成本、人工等原因,地膜覆盖和育苗移栽技术较少地在华北平原两熟区粮食作物中被采用。但是一旦发生干旱、冷害以及播种不及时等不利情况时,地膜覆盖和育苗移栽技术却往往是有效地补救措施。因此,探究这两类技术对主粮作物资源利用效率的影响具有理论意义,可作为冬小麦和夏玉米受灾的一种补救技术,并能为区域的作物种植技术调整提供依据。

以往,学者多从田间试验的角度研究地膜覆盖和育苗移栽技术对作物产量和资源利用效率的影响。高艳梅^[6]研究认为麦田休闲期覆膜有利于冬小麦增产,而生育期覆膜能在不同降水年份调控小麦产量。李尚中^[8]研究了不同覆膜方式对旱地玉米的增产效应^[7]。张常赫等^[8]于2012—2013年在长江下游棉区进行了不同育苗移栽方式对棉花资源利用效率影响的试验研究。赵聪等^[9]和赵正雄等^[10]对比研究了地膜覆盖和育苗移栽对玉米生长及产量的影响,结果表明地膜玉米的生长发育进程早于移栽玉米,地膜玉米的产量也比移栽玉米的产量高。虽然田间试验能较为准确地反映某个地方的情况,但是由于试验时间和地点的局限性,对于中长期的气候变化和年内变化来说缺少代表性。有学者从作物模型入手,验证了 AquaCrop 模型模拟小麦^[11-12]、玉米^[13]的生长情况以及水分利用效率,效果较好。本研究的切入点:1)已有学者从田间定位试验的角度研究了地膜覆盖和育苗移栽技术对资源利用效率的影响,为本研究以模型为研究手段提供了丰富的数据来源与实践基础;2)从水热资源约束风险和水热资源利用效率两方面研究作物种植技术对作物关键生育期的影响还鲜少;3)这两类技术作为华北平原两熟区的粮食作物种植技术的补充研究也较少。

本研究利用 AquaCrop 模型,模拟了河北曲周

地膜覆盖和育苗移栽技术下作物(冬小麦、夏玉米)的生长过程以及产量效应,并以此为基础,探究了这两类技术对作物受到的水热资源约束和水热资源利用效率的影响,旨在为其他作物效率和理论潜力的提升提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 AquaCrop 模型简介

AquaCrop 模型是 FAO 推广的水分驱动作物模型^[14],具有土壤-作物-大气连续系统结构,适用于水资源约束地区^[15],与现有作物模型相比,所需的参数更少,但精度较高^[16-17]。模型所需输入项目包括:逐日气象数据、土壤数据、作物数据和管理数据。所输出的项目包括:作物产量、生物量、作物冠层覆盖率和水分利用效率等。通过广泛收集的相关试验资料^[18-22],对该模型的气象、作物、土壤和管理模块的主要参数进行率定,旨在为下一步基于历史气象资料的技术管理措施下作物对水热资源利用的评价提供较为合理的参数支撑。

1.2 研究对象与数据获取

1.2.1 研究区概况

曲周位于华北平原中部(114°50′~115°13′E, 36°35′~36°57′N)属内陆冲击平原浅层咸水型盐渍化地区。该地区属暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 13.1℃,10℃以上积温 4 472.0℃,无霜期约 201 d,年平均降水量 400~700 mm,且主要集中在 7—9 月。光热水等气候资源较丰富,但受季风的影响,冬春寒冷干燥,夏季温暖多雨,蒸发强,严重的春旱和冬旱会影响冬小麦的苗期、返青、乳熟和成熟期等作物关键生育期^[23]。在传统冬小麦-夏玉米轮作的种植方式下,麦收后玉米的生长期较短,玉米的生产潜力将受到限制^[24]。土壤类型为潮土,是华北平原中极具代表性的地区之一。

1.2.2 数据来源

1)气象数据。曲周县 2004—2014 年的逐日气象数据(图 1)来源于中国气象数据网^[25],包括经度、纬度、海拔、辐射值、日照时数、平均风速、相对湿度、平均气温、最高及最低气温以及逐日降水量数据等,参考作物蒸散量 ET_0 由彭曼公式^[26]计算得到。

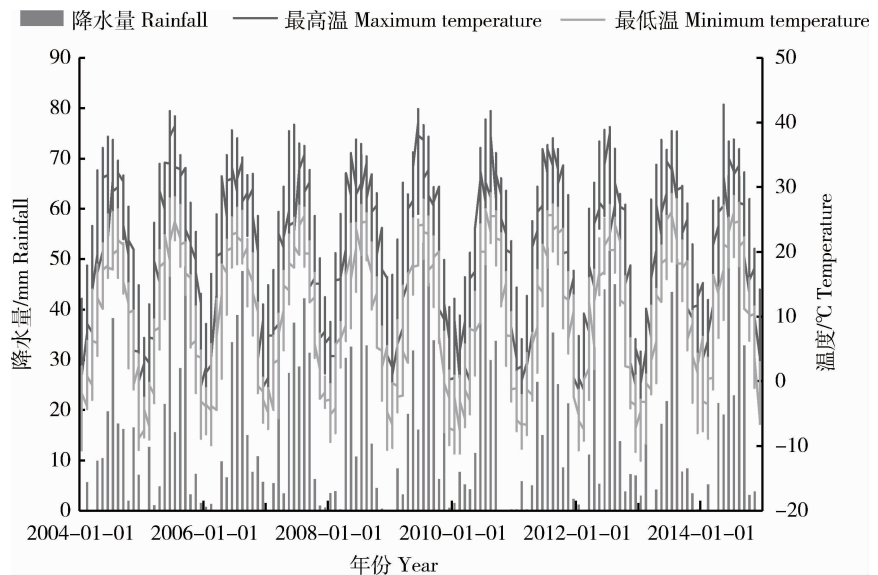


图 1 曲周 2004—2014 年日降雨量、最高温度和最低温度

Fig. 1 Daily rainfall, the maximum and the minimum temperature of Quzhou in 2004—2014

2)作物和管理数据。冬小麦和夏玉米的生长数据均来源于当地农户调查和已发表文献^[18-22],包括生长天数、作物冠层覆盖率以及灌溉制度设置。冬小麦在 11 月 19 日、次年 4 月 16 日和次年 5 月 14 日进行灌溉,灌水量分别为 90、100 和 110mm;夏玉米在 7 月

27 日和 8 月 16 日进行灌溉,灌水量均为 60 mm。

3)土壤数据。土壤剖面数据(表 1)来源于曲周试验站,包括土层数、土壤类型、质地、土层厚度、典型土壤的分层田间持水量、饱和含水量、凋萎湿度、饱和导水率等。

表 1 土壤参数数据
Table 1 Soil parameter

土壤层次/cm Soil layer	质地 Texture	永久萎蔫点/% Permanent wilting point	田间持水量/% Field capacity	饱和含水量/% Saturated water content	饱和导水率/(mm/d) Saturated hydraulic conductivity
0~35	粉砂壤土	13.0	33.0	46.0	150.0
35~85	粉砂壤土	13.0	33.0	46.0	150.0
85~145	粉砂壤土	13.0	33.0	46.0	150.0
145~200	粘壤土	23.0	39.0	50.0	100.0

1.3 研究方法

1.3.1 AquaCrop 模型主要参数调试与验证

1)模型主要参数调试。

根据 2004—2014 年曲周冬小麦和夏玉米的产量数据对模型参数进行率定和调试:以单产为目标函数,以模型提供的冬小麦、夏玉米等典型作物特性及相关生长参数作为初始值^[27],分析模拟产量与实测产量的差异,通过“试错法”调整和校正模型参数,直至模型的模拟结果和实测结果相吻合。

2)模型的验证。

采用标准化均方根差(NRMSE)对模型模拟的曲周地区冬小麦和夏玉米的产量进行验证。

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_e - Y_i)^2}}{Y_e} \tag{1}$$

式中:NRMSE 为标准化均方根差; Y_e 为冬小麦、夏玉米的实际产量,kg/hm²; Y_i 为模拟产量,kg/hm²; $\bar{Y_e}$ 为实际产量的平均值; n 为样本数。 $(Y_e - Y_i)$ 的绝对值越小,表明模型模拟值与实际值越接近。

$NRMSE < 10\%$, 认为模型模拟结果极好; $10\% \sim 20\%$, 认为模型模拟结果良好; 在 $20\% \sim 30\%$, 认为模型模拟结果一般; 如果 $> 30\%$ 则认为模型模拟效果较差^[28]。

1.3.2 水热资源利用评价指标

地膜覆盖技术的特点是通过增加地温和减少土

壤水分蒸发来影响作物的生长发育^[29], 而育苗移栽技术的特点是通过提前育苗延长作物生育期, 以充分利用气候和土地资源^[5]。两者对资源利用的影响主要体现在对水热资源的利用, 故本文主要是从水热资源约束风险和水热资源利用效率两方面对技术进行评价, 具体评价指标体系见表 2。

表 2 水热资源利用效率评价指标
Table 2 Evaluation indexes of water and heat resource utilization efficiency

评价指标 Evaluation index	具体指标 Specific indicators	评价内容 Comment content	评价方法 Evaluation method
水热资源约束风险评价	水分盈亏指数	作物受干旱的 评价指标	$C = \frac{P - ET_c}{ET_c}$
	热量指数	作物受低温冷害的 评价指标	$F = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)B}$ $B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1}$
水热资源利用效率评价	水热资源利用指数	生育期内水热条件对 作物产量形成的贡献	$I = SHUE + SWUE$

1) 水热资源约束风险评价。

本研究将从水分盈亏指数和热量指数对作物种植技术条件下的水热资源约束风险进行评价, 水分盈亏指数反映了作物在正常生长发育以及产量的形成过程中对水分的需求^[30], 常用作作物受干旱的评价指标。热量指数是反映作物在不同生长阶段对热量需求的指标^[31], 常用作作物受低温冷害的评价指标。水分盈亏指数和热量指数的具体数学公式分别为:

$$C = \frac{P - ET_c}{ET_c} \tag{2}$$

式中: C 为水分盈亏指数; P 为某时段降雨量, mm; ET_c 为同一时段的作物需水量, mm。若 $C > 0$, 表示水分盈余; $C = 0$, 表示水分平衡; $C < 0$, 表示水分亏缺; 其绝对值表示水分盈亏的程度。

$$F = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)B} \quad B = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1} \tag{3}$$

式中: F 为热量指数; T 为各生育期内平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_1, T_0, T_2 分别为作物不同生育期所需的下限温度、适宜温度和上限温度, $^{\circ}\text{C}$; B 为作物生长过程中对热量条件的反应常数。 F 值为 $0 \sim 1$, 当 $T \leq T_1$ 或 $T \geq T_2$ 时, $F = 0$; 当 $T = T_0$ 时, $F = 1$ 。它反映了作物不同生长发育时期的热量条件对作物的影响程度。从式(3)中可以看出, 热量条件对作物不同发育期的影响是非线性的, F 越大, 则表明作物生长时期的热量条件越好, 反之则热量条件越差。当 F 小于某一临界值时, 作物就有可能受到低温冷害的影响。根据农作学^[32]的研究成果, 整理得到冬小麦和夏玉米不同生育期的三基点温度(表 3)。

表 3 冬小麦和夏玉米不同生育期的三基点温度

Table 3 Three base point temperatures of winter wheat and summer maize at different growth stages
 $^{\circ}\text{C}$

作物生育期 Crop growth period	冬小麦 Winter wheat			夏玉米 Summer maize		
	T_1	T_0	T_2	T_1	T_0	T_2
播种-拔节	0	10	25	8	25	30
拔节-抽穗	12	15	26	22	26	30
抽穗-成熟	12	22	26	15	20	30

2)水热资源利用效率评价。

本研究将从资源综合利用的角度对作物种植技术条件下的水热资源利用效率进行评价,由于水、热资源利用效率的量纲不同,要反映水热资源对作物产量的综合影响,先将水、热资源利用效率进行无量纲化,使得两者处于同一个数量级上,具体计算方式参考文献[33],又由于粮食作物生产中,水、热资源同等重要,故两者的指标权重均为 1,所以水热资源利用指数为两者标准化后的累加值,具体的数学公式为:

$$HUE = \frac{Y}{\sum t} \tag{4}$$

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{5}$$

$$I = SHUE + SWUE \tag{6}$$

式中:HUE 为热量利用效率,kg/(hm² · h · °C);Y

为单位土地面积上作物产量,kg/hm²; $\sum t$ 为作物全生育期中≥0 °C 或≥8 °C 积温,°C;WUE 为水分利用效率,kg/m³,由 AquaCrop 模型确定;ET 为作物的总耗水量,mm;I 为水热资源利用指数;SHUE 为标准化热量资源利用效率;SWUE 为标准化水分资源利用效率。

2 结果与分析

2.1 AquaCrop 模型的参数率定和验证

将小麦和玉米的品种设置为弱抗寒品种济麦 22 和中晚熟品种郑单 958,收集整理关于这 2 个品种的地膜覆盖和育苗移栽技术的试验数据^[18-22],结合曲周冬小麦和夏玉米的物候信息^[34],得到模型中设置的冬小麦和夏玉米的生育期(表 4 和表 5)。

表 4 冬小麦模型生育期

Table 4 Growth stages of winter wheat in the model

处理	播种	出苗	越冬	返青	起身	拔节	抽穗	乳熟	成熟
Treatment	Sowing	Seedling	Wintering	Reviving	Standing	Jointing	Heading	Milk cooked	Maturity
覆膜	10-11	10-14	12-13	02-18	03-04	03-27	04-16	05-10	06-04
未覆膜	10-11	10-18	12-10	02-20	03-10	04-01	04-20	05-14	06-05

表 5 夏玉米模型生育期

Table 5 Growth stages of summer maize in the model

处理	播种	出苗	移栽	拔节	开花	灌浆	成熟
Treatment	Sowing	Seedling	Transplanting	Jointing	Flowering	Grain-filling	Maturity
移栽	06-01	06-05	06-15	07-20	08-06	08-20	09-24
未移栽	06-15	06-20	—	07-27	08-16	08-30	09-24

基于曲周气象、土壤以及冬小麦、夏玉米的作物生长等数据,根据 2004—2014 年冬小麦和夏玉米的

实际产量数据,采用“试错法”对模型参数进行校正,产量模拟结果见表 6。

表 6 冬小麦和夏玉米产量模拟结果

Table 6 The-simulation results of yields of winter wheat and summer maize

年份 Year	冬小麦单产/(kg/hm ²)			夏玉米单产/(kg/hm ²)		
	Winter wheat yield		相对误差/% Relative error	Summer maize yield		相对误差/% Relative error
	实测值	模拟值		实测值	模拟值	
	Measured value	Simulate value		Measured value	Simulatevalue	
2004	5 160	5 213	1.03	5 550	5 878	5.91
2005	5 190	5 112	1.50	5 700	5 848	2.60

表 6(续)

年份 Year	冬小麦单产/(kg/hm ²) Winter wheat yield		相对误差/% Relative error	夏玉米单产/(kg/hm ²) Summer maize yield		相对误差/% Relative error
	实测值	模拟值		实测值	模拟值	
	Measured value	Simulate value		Measured value	Simulatevalue	
2006	5 280	5 437	2.97	5 780	5 510	4.66
2007	5 325	5 553	4.28	6 045	6 707	10.95
2008	5 595	5 603	0.14	6 345	6 737	6.18
2009	5 790	5 793	0.05	6 435	6 799	5.66
2010	5 760	5 698	1.08	6 945	6 810	1.94
2011	6 729	6 335	5.86	8 276	8 775	6.04
2012	7 095	7 158	0.89	8 640	8 716	0.88
2013	7 156	6 964	2.68	8 514	8 761	2.90
2014	7 185	7 117	0.95	7 965	8 212	3.10

由表 6 可以看出,AquaCrop 模型模拟的冬小麦和夏玉米的产量与实际基本相符,相对误差分别为 0.05%~5.86%和 0.88%~10.95%,标准化均方根误差 NRESE 分别为 2.8%和 5.2%,均<10%,说明该模型在曲周模拟的准确程度较高。由于覆膜对降雨入渗有影响,但是模型中覆膜模块没有考虑降雨入渗,故通过改变地表径流曲线数和土壤表层蒸发量来实现覆膜和未覆膜对降雨径流的影响^[11]。由此,率定出研究中冬小麦和夏玉米的模型关键参数(表 7 和表 8)。

2.2 AquaCrop 模型的模拟结果

由率定好的作物参数以及当地土壤参数,将曲周县 2004—2014 年逐日气象数据的平均值作为理想气象条件,模拟得到无水肥盐等胁迫下冬小麦和夏玉米的产量分别为 7 808 和 8 533 kg/hm²,地膜小麦产量为 8 134 kg/hm²,移栽玉米产量为 9 505 kg/hm²。

表 7 冬小麦模型关键参数

Table 7 Key parameters of winter wheat in the model

模型参数 Model parameter	传统种植模式 Traditional planting mode	地膜覆膜技术 Plastic film mulching technology
生长总天数/d	238	237
初始冠层覆盖率/%	0.2	0.2
最大冠层覆盖率/%	90	95
植物生长最低温度/℃	0	0
植物生长最高温度/℃	26	26
收获指数	0.48	0.48
最大根深/m	1.5	1.5
覆盖栽培面积占比/%	0	90
地表径流曲线数	75	85
土壤表层蒸发量/mm	11	2

表 8 夏玉米模型关键参数

Table 8 Key parameters of summer maize in the model

模型参数 Model parameter	传统种植模式 Traditional planting mode	育苗移栽技术 Seedling transplanting technology
生长总天数/d	102	112
种植方式	播种	移栽
初始冠层覆盖率/%	0.2	0.31
最大冠层覆盖率/%	90	95
植物生长最低温度/℃	8	8
植物生长最高温度/℃	30	30
收获指数	0.48	0.48
最大根深/m	1.5	1.5
覆盖栽培面积占比/%	0	0
地表径流曲线数	75	75
土壤表层蒸发量/mm	11	11

2.2.1 冠层覆盖度模拟结果

叶面积指数是研究作物生物量和产量形成的重要指标,模型中用冠层覆盖度代替叶面积指数可以较为清晰地表现出作物的生长状况(图 2)。在苗期,冬小麦和夏玉米生长缓慢,叶面积指数较小,冠层覆盖度相对增长缓慢;拔节期以后叶面积指数增大,冠层覆盖度迅速增加,并于抽穗期达到最大值,之后随着生育期的变化,部分叶片开始衰老,冠层覆盖度也随之下降。

对于覆膜小麦而言,覆盖提高了土壤温度和水分含量^[35],在模型中地膜小麦的越冬期推迟了 3 d,返青期提前了 2 d,可以弥补冬小麦的冬前生长时间,并促进后期发育。返青后覆膜小麦的生育进程

明显加快,小麦拔节期提前 4 d,穗分化延长,有利于穗粒数的增加,故覆膜小麦的最大冠层覆盖度明显高于未覆膜的,最大冠层的增加为地膜小麦的高产奠定基础。对于移栽玉米而言,移入大田时就具有初始冠层覆盖度,故在模型中其初始冠层覆盖度的设置比未移栽玉米的高,又由于移栽玉米生育期提前,增长较快,故移栽玉米最大冠层覆盖度也明显高于未移栽。移栽玉米相较于直播玉米来说,由于提前育苗,其到达各生育节点的日期较早。这也就为移栽玉米更好地利用有限的光热资源提供了先决条件,移栽相对于未移栽玉米增加了灌浆时间,为移栽玉米高产和稳产奠定了基础^[36]。

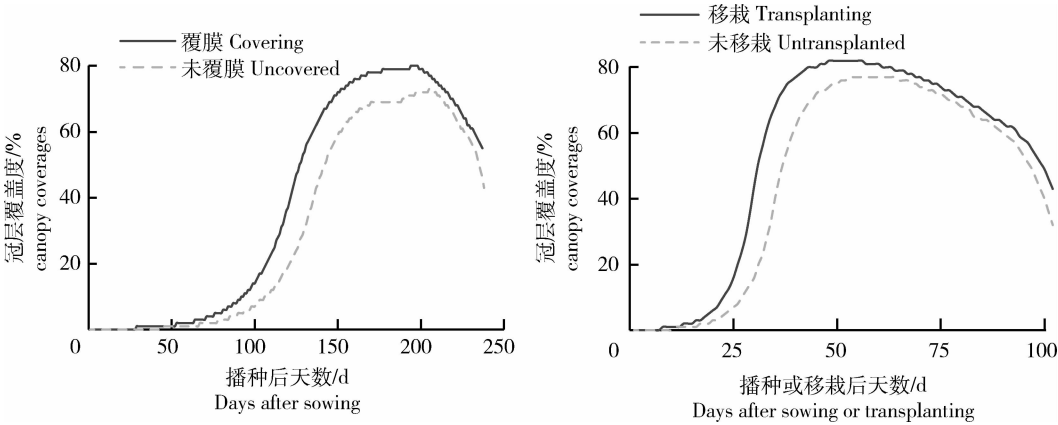


图 2 冬小麦和夏玉米冠层覆盖度的模拟结果

Fig. 2 Simulation results of canopy coverages of winter wheat and summer maize

2.2.2 生物量和产量模拟结果

地上部分生物量是决定作物产量的重要因素之一,图3和图4分别比较了覆膜和未覆膜条件下冬小麦以及移栽和未移栽条件下夏玉米生育期内的地

上部分生物量和产量的模拟值随时间的变化。从中可以看出,覆膜小麦的产量和生物量明显高于未覆膜的。移栽玉米的产量和生物量也明显高于未移栽的。

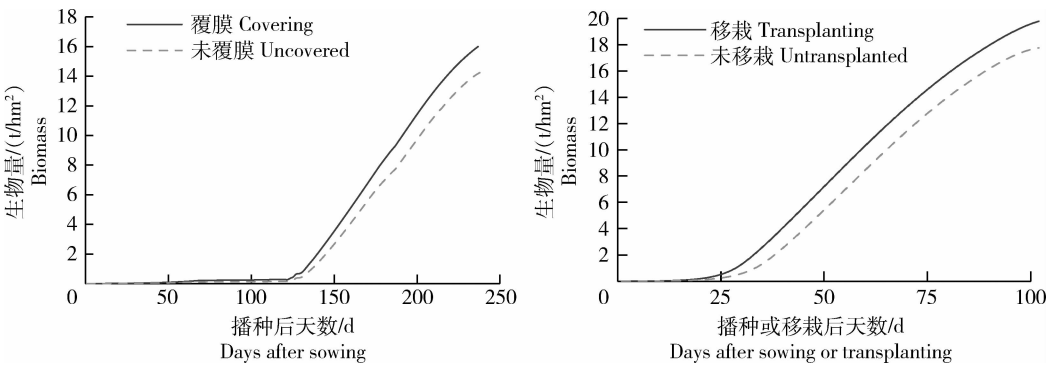


图3 冬小麦和夏玉米生物量的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of biomasses of winter wheat and summer maize

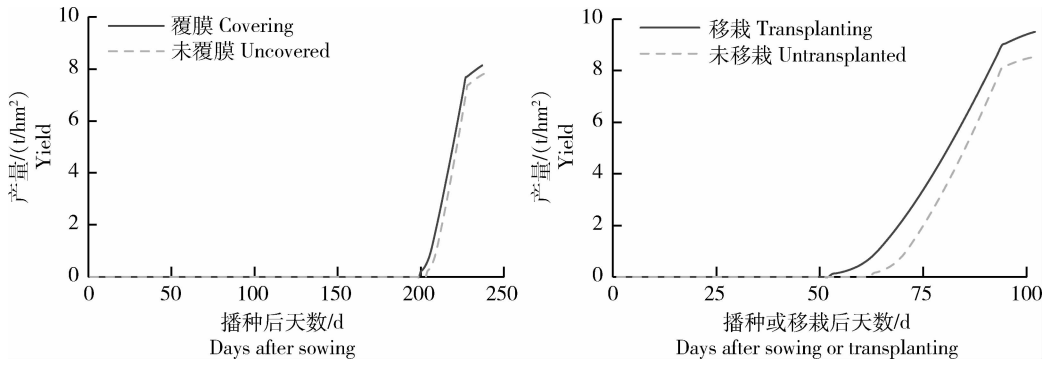


图4 冬小麦和夏玉米产量的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of yields of winter wheat and summer maize

2.3 地膜覆盖和育苗移栽技术对农作物水热资源利用的影响

这两类作物种植技术改变了冬小麦和夏玉米的生育期,生育期的改变影响了作物对水热资源的利用。故本研究主要从水热资源约束风险和水热资源利用效率2个方面对这两类技术在作物生育期内水热资源利用情况进行评价。

2.3.1 对水热资源约束风险的影响

水分盈亏指数和热量指数可以充分反映作物在不同生长发育阶段对水分和温度条件的要求(表9)。从水分盈亏指数可以看出,地膜覆盖技术对于冬小麦在生长过程中受到的水分胁迫缓解程度较低,仅4.2%。可能原因在于地膜阻挡了冬小麦在拔节-抽穗

期天然降水地渗入,所以该时期应该及时地揭膜。而育苗移栽技术对于夏玉米在生长过程中受到的水分胁迫缓解程度较高,可达到21.4%。其中,主要是缓解了夏玉米在播种-拔节期受到的水分胁迫。从热量指数来看,覆膜使冬小麦的生育进程提前,故覆膜小麦的热量指数小于未覆膜小麦。由于覆盖及时弥补了冬小麦由于生育期提前而导致的能量不足的问题,所以当冬小麦处于不利的能量条件时,地膜覆盖技术是保证其达到正常产量的有效手段。育苗也提前了夏玉米的生育进程,但移栽玉米在播种-抽穗时期的能量条件要优于未移栽玉米,抽穗-成熟期的能量条件却明显不如未移栽玉米,可能原因在于移栽玉米达到关键生育期所需要的能量资源比未移栽玉米的少。

表 9 冬小麦和夏玉米不同处理下生育期的水分盈亏指数和热量指数

Table 9 Crop water deficit index and Calorie index of winter wheat and summer maize under different treatments

作物 Crop	处理 Treatment	水分盈亏指数 Crop water deficit index				热量指数 Calorie index			
		播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟	全生育期	播种-拔节	拔节-抽穗	抽穗-成熟	全生育期
		S-J	J-H	H-M	S-M	S-J	J-H	H-M	S-M
冬小麦	覆膜	−0.66	−0.87	−0.66	−0.69	0.76	0.65	0.94	0.78
	未覆膜	−0.72	−0.75	−0.70	0.72	0.78	0.92	0.96	0.89
夏玉米	移栽	−0.09	−0.07	−0.16	−0.11	0.98	0.88	0.55	0.80
	未移栽	−0.20	0.00	−0.16	−0.14	0.96	0.86	0.66	0.83

注：S,播种;J,拔节;H,抽穗;M,成熟。
Note:S,Sowing;J, Jointing;H, Heading;M, Maturity.

2.3.2 对水热资源利用效率的影响

本研究从水热资源综合利用的角度进一步对比分析了技术条件下作物对水热资源的综合利用情况(表 10)。地膜覆盖和育苗移栽技术的运用使得冬小麦和夏玉米的热量资源利用效率和水分利用效率

均高于传统种植模式。覆膜小麦的水热资源利用指数比未覆膜小麦高 0.67,移栽玉米的水热资源利用指数比未移栽玉米高 0.50,由于水热资源利用效率提高,可使小麦产量增加 326 kg/hm²,玉米产量增加 972 kg/hm²。

表 10 冬小麦和夏玉米不同处理下的水热资源利用效率

Table 11 Water and heat resource utilization efficiency of winter wheat and summer maize under different treatments

作物 Crop	处理 Treatment	模拟产量/ (kg/hm ²) Simulate yield	积温/℃ Accumulated temperature	总耗水量/mm Total water consumption	热量资源	水分利用	水热资源
					利用效率/ (kg/(hm ² ·h·℃)) Heat utilization efficiency	效率/ (kg/m ³) Water use efficiency	利用指数 Water and heat resource utilization index
冬小麦	覆膜	8 134	2 059.0	369.7	3.95	2.20	1.38
	未覆膜	7 808	2 083.5	396.3	3.74	1.97	0.71
夏玉米	移栽	9 505	2 896.7	370.7	3.28	2.57	1.08
	未移栽	8 533	2 647.1	367.8	3.22	2.32	0.58

3 讨论与结论

3.1 讨论

AquaCrop 模型未设置地温和作物育苗等模块,对于模型中自带的地膜覆盖和育苗移栽模块,也只考虑了地膜对土壤蒸发的影响和作物移栽的时间,未考虑地膜对土壤温度和育苗对作物冠层覆盖度等的影响。故基于作物地膜覆盖和育苗移栽技术下的生长模拟和验证较少,仅刘匡等^[11]和杨宁等^[13]对 AquaCrop 模型覆膜栽培玉米和冬小麦水分利用过程进行了研究。故本研究通过冬小

麦和夏玉米生育期的改变来体现地膜覆盖和育苗移栽技术对作物(冬小麦、夏玉米)水热资源利用的影响(表 4)。

有研究表明,冬小麦的播种-越冬期,起身-乳熟期是其生长发育中的失水高峰期,也是其生长发育关键时期^[37]。宋文品等^[38]研究结果表明,地膜覆盖通过减少前期土壤蒸发,为冬小麦生长后期节省水分,在保证产量的前提下降低冬小麦全生育期耗水量,提高作物的水分利用效率。郭妮妮等^[39]研究表明在小麦出苗-拔节期覆膜的增温效果显著,在生育后期,覆膜的增温效果不明显。本研究中,小麦地膜

覆盖技术可有效缓解冬小麦在播种-拔节期和抽穗-成熟期受到的水分胁迫。由于覆膜小麦的生育期提前,其所处的气候热量条件不如未覆膜小麦,故当冬小麦处于不利热量条件时,覆膜是保证冬小麦达到正常产量的有效技术手段之一。育苗移栽技术主要是通过延长夏玉米的生育期,以充分利用其生长过程中的水热资源。本研究中,夏玉米生长时期的水热条件要明显优于冬小麦的生长条件,而通过育苗可延长夏玉米的生育期,使其能更好地利用一年中有限的降雨和光热资源。

3.2 结论

AquaCrop 模型模拟的曲周冬小麦和夏玉米的产量相对误差分别为 0.05%~5.86% 和 0.88%~10.95%, 标准化均方根误差 NRESE 分别为 2.8% 和 5.2%, 说明该模型的模拟结果较好。地膜覆盖技术和育苗移栽技术均能通过影响作物(冬小麦、夏玉米)的生育期,在一定程度上缓解冬小麦和夏玉米在播种-拔节时期受到的水分胁迫以及在生长过程中因积温不足带来的热量风险,故两种技术均是在冬小麦和夏玉米处于不利的生长条件下保障其正常生长发育的手段,能使作物(冬小麦、夏玉米)的水热资源利用效率和产量有所提高。

本研究对于冬小麦地膜覆盖技术和夏玉米育苗移栽技术的探讨并不是要取代传统冬小麦-夏玉米的种植模式,而是在一定范围内作为曲周地区一种必要的补充种植技术,尤其是当冬小麦和夏玉米处于干旱、冷害和播种不及时等不利条件时的一种补救措施。并且在技术的运用过程中应注意其适用性和可用性,不能盲目地采用,如地膜覆盖技术在冬小麦拔节-抽穗期就应及时揭膜以促进天然降水地下渗。

参考文献 References

[1] 李丽娟,王美云,薛庆林,崔彦宏,侯海鹏,葛均筑,赵明. 黄淮海双季玉米产量性能与资源效率的研究[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1229-1234
Li L J, Wang M Y, Xue Q L, Cui Y H, Hou H P, Ge J Z, Zhao M. Yield performance and resource efficiency of double-cropping maize in the Yellow, Huai and Hai River Valleys Region[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1229-1234 (in Chinese)

[2] 周文魁. 气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D]. 南京: 南京农业大学, 2012
Zhou W K. Impact of on Chinese and its[D]. Nanjing: Nanjing

Agricultural University, 2012(in Chinese)

[3] 李巧珍,李玉中,郭家选,刘晓英,徐春英. 覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(02): 25-30
Li Q Z, Li Y Z, Guo J X, Liu X Y, Xu C Y. Effects of field rainwater harvesting by plastic mulch and complement irrigation on soil water and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 25-30(in Chinese)

[4] Zhou L M, Li F M, Jin S L, Song Y J. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 41-47(in Chinese)

[5] 刘飞跃. 育苗移栽对春玉米生长发育、产量及品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016
Liu F Y. Effect of seedling transplanting on growth, yield and quality of maize (*Zea mays* L.) [D]. Haer bin: Northeast Agricultural University, 2016(in Chinese)

[6] 高艳梅,孙敏,高志强,崔凯,赵红梅,杨珍平,郝兴宇. 不同降水年型旱地小麦覆盖对产量及水分利用效率的影响[J/OL]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3589-3599
Gao Y M, Sun M, Gao Z Q, Cui K, Zhao H M, Yang Z P, Hao X Y. Effects of mulching on grain yield and water use efficiency of dryland wheat in different rainfall years[J/OL]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18): 3589-3599 (in Chinese)

[7] 李尚中,王勇,樊廷录,王立明,赵刚,唐小明,党翼,王磊,张建军. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(5): 922-931
Li S Z, Wang Y, Fan T L, Wang L M, Zhao G, Tang X M, Dang Y, Wang L, Zhang J J. Effects of different plastic film mulching modes on soil moisture, temperature and yield of dryland maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5): 922-931(in Chinese)

[8] 张常赫,戴艳娇,杨洪坤,张馨月,杜详备,陈兵林,周治国. 不同栽培方式对长江下游棉田资源利用效率的影响[J/OL]. 作物学报, 2015, 41(7): 1105-1111
Zhang C H, Dai Y J, Yang H K, Zhang X Y, Du X B, Chen B L, Zhou Z G. Effects of different cultivation patterns on cotton field resources use efficiency in Yangtze River Valley[J/OL]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(7): 1105-1111(in Chinese)

[9] 赵聪,张伟,韩彦龙,姜春霞,刘化涛,张冬梅,黄明镜,黄学芳,刘恩科. 地膜覆盖与育苗移栽对山西寒旱区春玉米生长及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(3): 35-38
Zhao C, Zhang W, Han Y L, Jiang C X, Liu H T, Zhang D M, Huang M J, Huang X F, Liu E K. Effects of plastic film covering and cultivation by setting seedling on growth and yield of spring corn in cold and arid region of Shanxi Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(3): 35-38 (in Chinese)

- [10] 赵正雄,张福锁,赵明,毛达如. 不同种植方式对玉米生长发育和产量的影响[J]. 农业现代化研究,2002(3):197-199
Zhao Z X, Zhang F S, Zhao M, Mao D R. Influence of Establishment on Maize Growth and Yield[J]. *Research of Agricultural Modern Iization*, 2002(3):197-199(in Chinese)
- [11] 刘恒,丁奠元,张浩杰,褚晓升,余坤,冯浩. 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/OL]. 中国农业科学,2017,50(10):1841-1854
Liu J, Ding D Y, Zhang H J, Chu X S, Yu K, Feng H. Evaluation analysis of AquaCrop model in modeling winter wheat growing development and soil moisture under plastic mulching[J/OL]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017,50(10): 1841-1845(in Chinese)
- [12] Mkhmbela M S, Bullock P R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in western Canada [J]. *Agricultural Water Management*, 2012,110:16-24
- [13] 杨宇,孙占祥,张立桢,郑家明,冯良山,李开宇,张哲,冯晨. 基于改进 AquaCrop 模型的覆膜栽培玉米水分利用过程模拟与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(S1):122-132
Yang N, Sun Z X, Zhang L Z, Zheng J M, Feng L S, Li K Y, Zheng Z, Feng C. Simulation of water use process by film mulched cultivated maize based on improved AquaCrop model and its verification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (S1): 122-132 (in Chinese)
- [14] Hsiao T C, Heng L, Steduto P, Lara B R, Raes D, Fereres E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water III: Parameterization and testing for maize [J]. *Agronomy Journal*, 2009,101(3):448-459
- [15] Farahani H J, Izz G, Oweis T Y. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton [J]. *Agronomy Journal*, 2009, 101(3): 469-476
- [16] 李会,刘钰,蔡甲冰,毛晓敏. AquaCrop 模型的适用性及应用初探[J]. 灌溉排水学报,2011,30(3):28-33
Liu H, Liu Y, Cai J B, Mao X M. Change law and calculation method of phreatic evaporation in the Yellow River irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30 (3):28-33(in Chinese)
- [17] 邢会敏,徐新刚,冯海宽,李振海,杨福芹,杨贵军,贺鹏,陈召霞. 基于 AquaCrop 模型的北京地区冬小麦水分利用效率[J/OL]. 中国农业科学,2016,49(23):4507-4519
Xing H M, Xu X G, Feng H K, Li Z H, Yang F J, Yang G J, He P, Chen Z X. water use efficiency of winter wheat based on aquacrop model in Beijing [J/OL]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016,49(23):4507-4519(in Chinese)
- [18] 籍姿杰. 夏玉米育苗移栽技术及其产量效应研究[D]. 保定: 河北农业大学,2014
Ji Z J. The research of maize transplanted technology and production effect[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014(in Chinese)
- [19] 项艳. AquaCrop 模型在华北地区夏玉米生产中的应用研究[D]. 泰安:山东农业大学,2009
Xiang Y. AquaCrop model application of summer maize planting in North China [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2009(in Chinese)
- [20] 蔡永强,牛新胜,焦小强,程亮,刘全清,申建波,张宏彦. 灌溉条件下覆膜对冬小麦根系分布及抗倒性状的影响[J]. 华北农学报,2014,29(S1):328-332
Cai Y Q, Niu X S, Jiao X Q, Cheng L, Liu Q Q, Shen J B, Zhang H Y. Effects on root distribution and lodging traits of winter wheat under irrigation mulching[J]. *Acta Agricultrae Boreali-Sinica*, 2014, 29 (S1): 328-332 (in Chinese)
- [21] 籍姿杰,高肖贤,魏静,马文奇. 播期和移栽对夏玉米生长发育及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2014,42(11):113-115
Ji Z J, Gao X X, Wei J, Ma W Q. Effects of sowing date and transplanting on growth and yield of summer maize [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42 (11): 113-115 (in Chinese)
- [22] 裴志超,郎书文,宋慧欣,周继华,刘永霞,满杰,刘国明. 育苗移栽处理对北京市夏播玉米植株及产量性状的影响[J]. 作物杂志,2014(5):52-54
Pei Z C, Lang S W, Song H X, Zhou J H, Liu Y X, Man J, Liu G M. The effect of seedling transplant on plant and yield characters of summer maize in Beijing[J]. *Crops*, 2014(5): 52-54(in Chinese)
- [23] 江丽,薛翠翠,安萍莉. 基于作物生育期灾害敏感指数的旱灾粮食减产研究[J]. 水土保持研究,2011,18(1):183-187, 191,275
Jiang L, Xue C C, An P L. Research on the amount of grain loss by droughts based on the sensitive index of crop growth period[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011,18 (1):183-187,191,275(in Chinese)
- [24] 付雪丽,张惠,贾继增,杜立丰,付金东,赵明. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究[J]. 作物学报, 2009,35(9):1708-1714
Fu X L, Zhang H, Jia J Z, Du L F, Fu J D, Zhao M. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009,35(9):1708-1714(in Chinese)
- [25] 中国气象数据网[EB/OL]. (2017-11-12). http://data.cma.cn/dataService/index/datacode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.html
China Meteorological Data Network [EB/OL]. (2017-11-12). http://data.cma.cn/dataService/index/datacode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.html(in Chinese)
- [26] 宋妮,孙景生,王景雷,陈智芳,强小嫚,刘祖贵. 基于 Penman 修正和 Penman-Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. 农业工程学报,2013,29(19):88-97
Song N, Sun J S, Wang J L, Chen Z F, Qiang X M, Liu Z G. Analysis of difference in crop coefficients based on modified

- Penman and Penman-Monteith equations[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (19): 88-97(in Chinese)
- [27] FAO. Referencemanual, chapter1-AquaCrop[M]. Rome: FAO, 2009
- [28] 王连喜, 吴建生, 李琪, 顾嘉熠, 薛红喜. AquaCrop 作物模型应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1100-1106
Wang L X, Wu J S, Li Q, Gu J Y, Xue H X. A review on the research and application of AquaCrop model[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(10): 1100-1106(in Chinese)
- [29] Chen Y L, Liu T, Tian X H, Wang X F, Li M, Wang S X, Wang Z H. 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
- [30] 王晓东, 马晓群, 许莹, 陈超. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 665-672
Wang X D, Ma X Q, Xu Y, Chen C. Temporal Analysis of the crop water surplus deficit index for the whole growth period in the Huaihe Basin[J]. *Resources Science*, 2013, 35(3): 665-672(in Chinese)
- [31] 郭建平, 田志会, 左旭. 东北地区水稻热量指数预测模型[J]. 自然灾害学报, 2004 (3): 138-145
Guo J P, Tian Z H, Zuo X. Forecasting models of heat index for rice in Northeast China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004(3): 138-145(in Chinese)
- [32] 李军. 农作学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2016
Li J. *Science of Farming System* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016(in Chinese)
- [33] 赵同应, 朱凌云, 胡良温, 赵丽平, 卫丽萍. 山西粮食作物气候资源利用效率及提高途径分析[C] // 第27届中国气象学会年会气候资源应用研究分会论坛论文集. 北京: 中国气象学会, 2010: 8
Zhao T Y, Zhu L Y, Hu L W, Zhao L P, Wei L P. The Analysis on the climate resources utilization efficiency and improvement in grain crops in Shanxi Province [C]. In: Collection of field theory of climate resources applied research branch of the 27th annual meeting of China Meteorological Society. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010: 8 (in Chinese)
- [34] 张荣群, 王盛安, 高万林, 孙玮健, 王建仑, 牛灵安. 基于时序植被指数的县域作物遥感分类方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 246-252
Zhang R Q, Wang S A, Gao W L, Sun W J, Wang J L, Niu L A. Remote-sensing classification method of county-level agricultural crops using time-series NDVI[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46 (S1): 246-252(in Chinese)
- [35] 陈玉章, 柴守玺, 范颖丹, 程宏波, 黄彩霞, 谭凯敏, 常磊, 杨长刚. 覆盖模式对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 403-409
Chen Y Z, Chai S X, Fan Y D, Cheng H B, Huang C X, Tan K M, C L, Yang C G. Effects of mulching models on soil temperature and yield of winter wheat in rainfed area[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(4): 403-409 (in Chinese)
- [36] 范仲学, 王璞, Marion B Z, Wilhelm C. 育苗移栽夏玉米灌浆特性研究[J]. 玉米科学, 2001 (2): 47-49
Fan Z X, Wang P, Marion B Z, Wilhelm C. Study on grain filling characteristics of transplanted summer maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2001(2): 47-49(in Chinese)
- [37] 姚宁, 宋利兵, 刘健, 冯浩, 吴淑芳, 何建强. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2379-2389
Yao N, Song L B, Liu J, Feng H, Wu S F, He J Q. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2379-2389(in Chinese)
- [38] 宋文品, 黄菁, 陈晓丽, 王利春, 孙维拓, 王志敏, 薛绪掌, 郭文忠, 李友丽, 陈菲. 地膜覆盖与常规灌溉对冬小麦耗水特征和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1445-1455
Song W P, Huang J, Chen X L, Wang L C, Sun W T, Wang Z M, Xue X Z, Guo W Z, Li Y L, Chen F. Effects of plastic film mulching and conventional irrigation on water consumption characteristics and yield of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24 (11): 1445-1455(in Chinese)
- [39] 郭妮妮. 覆盖种植的水热效应及其对轮作作物生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
Guo NN. Effects of mulching culture on thermal-moisture status and growth of rotation crop[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016(in Chinese)

责任编辑: 王燕华