文章编号:1000-7601(2020)01-0013-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.02

西北旱区玉米不同覆膜方式下土壤水热效应数值模拟研究

魏万成,戴 飞,张锋伟,张仕林,史瑞杰,刘元祥

(甘肃农业大学机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了进一步探明西北旱区玉米在不同覆膜方式下土壤水热效应规律以及保温保水性能,采用数值模拟的方法通过 ABAQUS 软件分别建立了露地平作、全膜平作、单垄覆膜、全膜双垄沟播 4 种覆膜方式下的土壤模型,并对不同覆膜方式下玉米出苗期土壤热平衡和降雨入渗进行了数值模拟试验。通过热平衡模拟得出,起垄和覆膜改变了土壤剖面温度和热通量分布,增加了表层温度和热传递能力。在 40 cm 土层范围内全膜平作模式下垄沟内土壤平均温度最高,为 24.1℃,其次为全膜双垄沟播模式,但全膜双垄沟播模式下温度变化趋势最为缓慢,稳定性最好。降雨入渗模拟结果表明:降雨结束后全膜双垄沟播模式产生了明显的侧渗现象,垄沟内土壤平均含水率最高,为 19%,高于其他 3 种模式。研究表明在玉米出苗期全膜双垄沟播技术保水和保温性达到最佳。

关键词:覆膜方式;玉米;全膜双垄沟播;土壤水热效应;西北旱区

中图分类号:S152.7;S152.8;S513 **文献标志码**:A

Numerical simulation on soil water-thermal effect under different film mulching methods of maize in the arid of Northwest China

WEI Wancheng, DAI Fei, ZHANG Fengwei, ZHANG Shilin, SHI Ruijie, LIU Yuanxiang

(*Mechanical and Electrical Engineering College*, *Gansu Agriculture University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to explore the thermal effect and regularity of soil water and water preservation performance of maize under different mulching modes, and by means of numerical simulation experiment, the soil model of four kinds of mulching modes of flat-planting without mulching, complete mulching, and flat-planting, single ridge mulched with plastic film, and whole plastic-film mulching on double ridges planting was established by ABAQUS software, and the soil thermal balance and rainfall infiltration in corn seedling stage under different laminating modes were simulated. The results of thermal equilibrium simulation showed that the ridge and mulch changed the distribution structure of soil temperature and heat flux, and increased the surface temperature and heat transfer capacity. The average temperature in the complete mulching and flat-planting mode was the highest (24.1℃), in the range of 40 cm soil layer the temperature change trend was the slowest and most stable under the whole plastic-film mulching on double ridges mode. The simulation results of rainfall infiltration showed that the whole plastic-film mulching on double ridges mode produced obvious lateral seepage, and the average water content of maize in the furrow was the highest (19%), higher than the other three modes. The final results showed that the water preservation performance of the whole plastic-film mulching on double ridges technique was the best at the corn seedling stage.

Keywords: film mulching methods; maize; whole plastic-film mulching on double ridges; soil water-thermal effect; Northwest China

地膜覆盖技术由于其优异的抗旱保墒效果,自推广以来极大地促进了我国西北旱区农业增收。该技术采用地膜全覆盖技术,不但可显著提高农作物的增产效果,同时具有保温、保湿、抑制杂草生

收稿日期:2019-02-25 **修回日期**:2019-07-17

基金项目:国家自然科学基金(51775115,51405086);甘肃省科技重大专项计划项目(18ZD2NJ021)

作者简介:魏万成(1992-),男,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为农业工程技术与装备。E-mail:897559670@qq.com

通信作者:戴飞(1987-),男,甘肃榆中人,副教授,主要从事西北旱区膜土-机器-植物互作系统研究。E-mail: daifei@gsau.edu.cn

长,以及防止病虫害发生的作用。近年来全膜双垄沟播技术为我国北方玉米增产增收做出了卓越贡献[1]。玉米全膜双垄沟种床土壤水热效应的研究将科学地给出水分年际持续性、温度分布、雨水入渗等相关规律和玉米产量的关系,对此,相关学者通过大田试验全面系统分析了土壤水热效应对玉米产量的影响,取得了一系列研究成果[2-3]。然而,大田试验通常会受到气候、土壤条件、地理位置等客观条件限制,还需要大量重复试验,且试验周期较为漫长。通过数值模拟的方式来研究玉米全膜双垄沟种床土壤水热效应可有效降低研究成本和周期。

ABAQUS 作为国际上先进的非线性有限元软件之一,不断吸取最新的分析理论和计算机技术。贴合实际广泛应用于机械、土木、水利等工程领域,尤其在岩土领域,ABAQUS 能结合复杂的土壤条件提供完善的土体本构模型[4-5],并结合其强大的建模能力和特有的 solis 分析步来求解复杂的土壤问题。相关学者已借助 ABAQUS 在土壤渗流、旋耕、深松、开沟、强度分析等领域取得了相似度极高的仿真模拟效果[6-9]。这说明只要建立正确的土壤模型、选择合适的土体本构模型、给出正确的土壤参数和模型载荷边界条件后,ABAQUS 有能力解决土壤水热效应数值模拟问题。

通过数值模拟的方式得到不同覆膜方式下土壤热平衡以及降雨入渗结果具有可视化程度好、提取数据方便、试验方案处理迅速等优点。因此,为了更进一步探明玉米在不同覆膜方式下水热效应规律和增产效应,需要提供强有力的理论依据和分析。本文结合相关学者的研究基础和经验在 ABAQUS 中建立了土壤的虚拟模型,通过对其水热效应规律的分析得到了全膜双垄沟播为最优覆膜方式的优势和理论支撑,以期为后期全膜双垄沟播技术水热效应、种床的高效构建和增产机理研究提供参考。

1 模型及原理

1.1 土体本构模型的选择

土壤作为典型的多孔介质其受力关系十分复杂,应力应变关系往往具有高度非线性、弹塑性、剪胀型和各项异性等。因此,想要得到较为准确的仿真结果选择合适的土体本构模型至关重要。除了常规的弹塑性模型和多孔介质弹塑性模型外,ABAQUS 还提供了一系列强大的土体本构模型,其中 Mohr-Coulomb 模型主要适用于颗粒状材料。而土壤实际就是形状大小不同的颗粒在自然环境下堆积而成的[4],因此本文选用 Mohr-Coulomb 模型作为仿真模型的本构。

1.2 模型基本原理

ABAQUS 中给出的 Mohr-Coulomb 模型受力屈服面函数为[4-5];

$$F = R_{mc}q - p\tan\varphi - c = 0 \tag{1}$$

式中,p 和 q 为应力面符号;φ 为应力面上 Mohr-Coulomb 屈材料摩擦角,$0° \leqslant \varphi < 90°$;$c$ 为土壤材料的粘聚力(MPa);R_{mc} 为屈服面在 π 面的形状控制函数,按照下式计算:

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi}\sin\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3}\cos\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right)\tan\varphi \tag{2}$$

式中,Θ 为极偏角,定义为 $\cos 3\Theta = \frac{r^3}{q^3}$;$r$ 为第三应力不偏量。

采用上述函数会在屈服面产生尖角导致计算繁琐、收敛性差等问题,因此在等势面处理上 ABAQUS 采用了连续光滑的椭圆函数作为等势面,函数表达式如下;

$$G = \sqrt{(\varepsilon C_0\tan\beta)^2 + (R_{mc}q)^2} - p\tan\beta \tag{3}$$

式中,C_0 为初始粘聚力(MPa);β 为剪胀角(°);ε 为土壤应力空间子午面上的偏心率,它控制了 G 在子午面上的形状与函数的渐近线之间的相似度,ABAQUS 中 ε 默认取 0.1。

其余参数可在选择土体本构模型时在材料属性中自行制定,其中粘聚力在软件中制定后即默认不变,即将土体视为理想的线性模型。

1.3 土壤材料参数选择

土壤参数直接决定了土壤的特性,合适的土壤参数是得到准确模拟结果的关键。根据相关文献和试验参考土壤模型的主要材料参数如表 1 所示,采用 ABAQUS 米制国际单位[7-9]。

2 模拟试验方案

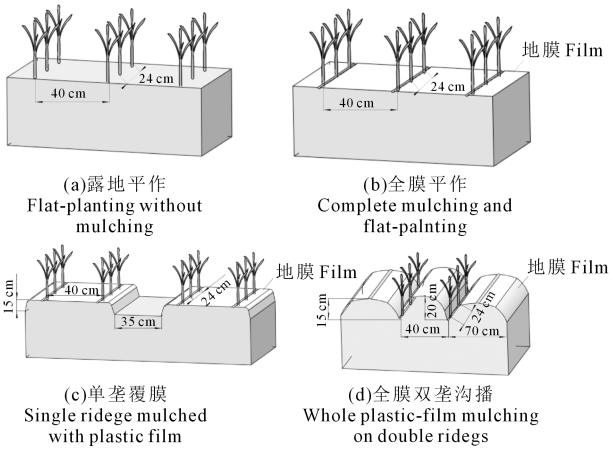
以玉米出苗期为时间点,研究了不同覆膜方式下土壤的水热效应,参考已有的研究和农艺要求在 ABAQUS 中分别建立了如图 1 所示的露地平作、全膜平作、单垄覆膜和全膜双垄沟播 4 种模式下的土壤模型[10-11]。技术规范为:露地平作下行距 40 cm,株距 25 cm,穴播种植;全覆膜平作下不起垄全地覆膜穴播,行距 40 cm,株距 24 cm;单垄覆膜模式为起单垄后覆膜穴播,垄面宽 70 cm,垄距 35 cm,采用垄上双株栽培,行距 40 cm,株距 24 cm;全膜双垄沟播

模式下大垄宽 70 cm、高 15 cm,小垄宽 40 cm、高 20 cm,垄沟内穴播,行距 40 cm,株距 24 cm,土壤深度均为 40 cm。以此模型为研究对象分别模拟了 4 种模式下土壤的水热效应规律,并得出可靠的模拟效果,提取相关数据进一步分析对比后得到保水增温效果最优的覆膜方式并给出理论支撑。

表 1　土壤材料属性参数

Table 1　Parameters of soil

参数 Parameter	数值 Value
相对密度 Relative density/(g · cm^{-3})	1.79
弹性模量 Elastic modulus/MPa	1.14
泊松比 Poisson-pine ratio	0.3
粘聚力 Cohensive strength/kPa	15
剪胀角 Dilatancy angle/(°)	0.1
内摩擦角 Friction angle/(°)	12.21
比热容 Specific heat capacity/(J · m^{-3} · K^{-1})	2.5
导热系数 Thermal conductivity/(W · m^{-1} · ℃$^{-1}$)	2
平均渗透系数 Average permeability cofficient	0.018
孔隙比 Void ratio	1



(a)露地平作 Flat-planting without mulching
(b)全膜平作 Complete mulching and flat-palnting
(c)单垄覆膜 Single ridege mulched with plastic film
(d)全膜双垄沟播 Whole plastic-film mulching on double ridegs

图 1　不同覆膜方式下土壤模型

Fig.1　Models of soil under different film mulching

3　模拟试验与结果分析

3.1　模型基本原理

土壤本身作为一种导热介质,在其内部主要进行的是导热交换。按照传热学理论旱区黄绵土是典型的多孔性土壤,分析时可以忽略空气的传热作用。其传热系数为坚实土壤导热系数和多孔系数的乘积,导热规律基本符合常规固体内部导热规律[12-13]。因此只要给出正确的初始边界条件就可以精确地得出温度场和传热规律。

由于一个地区的天气和土质是基本一致的,研究一定面积的土壤的过程中可以将其抽象成半无限大平板的一维温度响应问题。研究土壤的水分变化、导热系数、比热等变化下如果考虑热物性变化,就可简化一维问题,对应的一维热扩散基本方程为[14]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k_1(x)\frac{\partial T}{\partial x}\right]=C(x)\quad(t>0,x>0)\tag{4}$$

式中,C 为比热容(J · m^{-3} · K^{-1});k_1 为传热系数;t 为时间(h);x 为土壤深度(cm);T 为土壤温度(℃)。

对于不同条件的土壤给出相应的初始边界条件便可得出对应的温度分布。在 ABAQUS 中也是基于以上理论建立数学模型进行求解[4]。

ABAQUS 对土壤饱和渗流和非饱和渗流问题有强大的计算分析能力,尤其是针对灌溉降雨等非饱和渗流能够准确得到土壤地下水分的分布、含量和迁移状况[4]。作为一种均质且各项同性的多孔介质,单纯的雨水入渗仿真可忽略土壤中的气体对土壤水分的影响,不考虑根系的吸水作用,根据渗流基本定律——达西定律和能量守恒相结合得到非饱和一维 Richards 渗流控制方程来描述垄体内土壤水分运动[15-16]。

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right]\tag{5}$$

式中,θ 为单位体积土壤含水量(%);t 为时间(h);z 为土壤深度(cm);K 为土壤导水率(cm^3 · h^{-1});h 为土壤压力水头(cm)。

ABAQUS 规定应力以拉为正,而液体和气体压力则以压为正。因此 ABAQUS 中的有效应力原理和常规土力学表达略有差异,如下表示[8]:

$$\bar{\sigma}=\sigma+[x\mu_\omega+(1-x\mu_\partial)]I\tag{6}$$

式中,σ 为总应力(MPa);$\bar{\sigma}$ 为有效应力(MPa);x 为土壤饱和度,μ_ω 为孔隙水压力(MPa);μ_∂ 为空隙气体压力(MPa)。

3.2　热平衡过程模拟

3.2.1　模型前处理及边界条件　玉米是感温性很强的作物,土壤温度直接影响了玉米种子的发芽、出苗和生长效率[15]。例如,玉米种子发芽出苗效率在土壤温度为 10℃~12℃时最佳,而最适宜的根系生长温度为 24℃左右[12]。因此研究不同覆膜方式下土壤的温度分布特性和变化规律具有十分重要的意义。根据典型玉米种植地区甘肃省土壤类型,本文以黄绵土为研究对象,默认土壤空隙结构温度不受含水率变化影响,即土壤环境为理想状态[13],同时不考虑土壤水分含量对热平衡的影响。

为了降低仿真模拟成本和时间,在不影响模拟结果的前提下将土壤模型处理为二维平面模型,选取垄体任意剖面为研究对象,选择 Mohr-Coulomb

土体本构模型,给定表 1 的土壤材料弹塑性参数,并指派截面给模型,选择单元类型 DC2D4 单元。根据土壤热平衡理论,土壤热量主要来源为太阳热辐射,地膜覆盖可以提高辐射量,增加土壤表层温度。且下层土壤的热量主要来源于表层热交换[12],因此选择热传导分析步。表层温度边界为土壤或地膜表层实测温度值。取 2017 年 5 月初在甘肃省兰州市榆中县试验田晴天 12∶00—14∶00 多次测量后的平均值。测量结果为:露地平作土壤表层平均温度为 18.5℃,全膜平作地膜表层平均温度为21.8℃,单垄覆膜垄体表层平均温度为 28℃,垄沟内为 24℃。全膜双垄沟播大小垄垄体地膜表层平均温度为 27.6℃,与垄沟表层温度差为 3℃~4℃,与覆土带温差为 1.4℃~2℃。假设日照时间为 2 h,期间天气状况无重大变化且日照良好,因此将模拟时间设置为 2 h。

3.2.2 垄体土壤温度分布 分别对以上 4 种模型施加边界条件,ABAQUS 会根据模型结构、分析步以及边界条件计算出 2 h 后土壤剖面温度结果。如图 2 所示,在热辐射持续 2 h 后土壤剖面温度分布差异性很大,说明起垄和覆膜改变了土壤的温度分布结构。变化规律上总体表现为:随着土壤深度的增加温度逐渐下降,且有地膜覆盖的土壤表层温度明显高于其他模式。另外温度分布上差异也较为明显,在同一深度的土壤剖面内露地平作和全膜平作土壤温度分布在水平方向上无明显差异,而单垄覆膜和全膜双垄沟播模式土壤剖面温度和垄体结构有直接联系,随着深度增加逐渐稳定。总体来看地膜对浅层土壤的增温效果十分明显,因此有必要对垄沟内温度进行进一步研究。

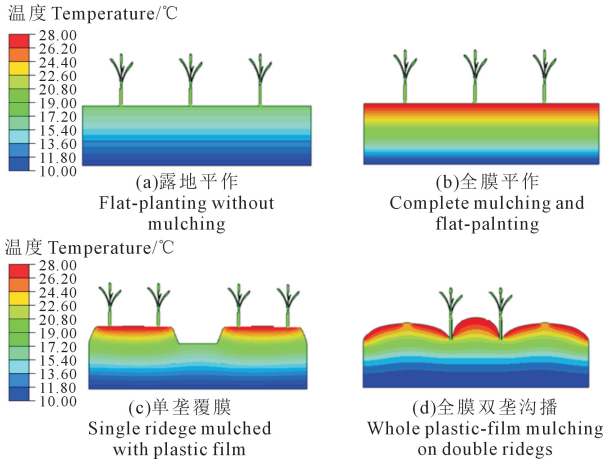


图 2 垄体土壤温度分布

Fig.2 Temperature distribution in the body of ridge

3.2.3 垄沟内土壤温度变化 玉米出苗期茎叶生长缓慢,根系发展迅速,想要达到苗早、苗足、苗齐、苗壮需求需要保证土壤有充足的热量和水分。而研究不同覆膜方式下土壤热效应关键要看垄沟内土壤温度变化规律[10]。因此,通过 ABAQUS 后处理分别提取了模型垄沟内土壤的温度值得到了垄沟内土壤在深度方向的变化曲线,如图 3 所示。出苗期垄沟内土壤温度变化趋势总体表现为表层大于深层,随着土层深度的增加温度逐渐下降,露地平作模式下土壤温度始终小于其他 3 种覆膜方式,说明该模式下土壤的保温性能最差。土层深度在 10 cm 时,各模型下降速率出现了明显的拐点。在 10 cm 浅层土壤内,全膜双垄沟播模式土壤温度下降趋势最为缓慢,基本保持在 24℃左右,这一温度更加接近于玉米种子发育和根系生长所需的最适温度(23℃~25℃),而其他覆膜方式下温度下降趋势较为明显。说明全膜双垄沟播模式能够保持垄沟内浅层土壤热量的恒定,更有利于根系的生长。另外,从图 3 观察到全膜双垄沟播和单垄覆膜下 40 cm 土层深度范围内土壤温度始终保持在 22℃左右。造成上述现象的主要原因是地膜覆盖在增加土壤表层的热辐射量的同时有效抑制了土壤热量的散失,以及全膜双垄沟播大小垄设计和地膜覆盖的双重因素在抑制土壤热量散失的同时还具有平衡土壤热量的作用[2]。以上结果与文献[2-3]有关研究相吻合,充分验证了数值模拟的可靠性。说明在土壤保温性能上全膜双垄沟播明显优于其他 3 种模式。

3.2.4 垄体土壤热通量变化 土壤热通量虽然不是土壤植被大气系统能量的主要支出项,但直接影响土壤温度的变化速度和时间,其大小方向决定了土壤得失热量的多少,分析土壤热通量分布特征可以了解土壤能量的收支情况[15-16]。因此土壤热通量的研究对垄体土壤热平衡分析有着重要意义。在 ABAQUS 中添加热通量场输出后会得到土壤剖面热通量分布云图(图 4)。由图 4 可知,热通量变化梯度和温度基本保持一致,即土壤表层大于底层。全膜双垄沟播和单垄覆膜两种模式沿深度方向热通量变化差距较为明显且规律性差,说明地膜覆盖和垄体形状对土壤表层热量收支产生的影响大于深层土壤,其主要原因是垄体表层地膜使土壤热辐射增加以及不同结构的垄体可接收的热辐射存在差异。

3.2.5 垄沟内土壤热通量变化 为了探究垄沟内土壤热量收支的详细情况,参照温度数据提取方式

得到垄沟内土壤热通量在土层分布方向的变化曲线(图 5)。如图 5 所示,不同覆膜方式下热通量变化差异很大,露地平作模式热通量在深度方向上变化不大,基本保持在 18 W·m^{-2}左右,数值为正值说明单位时间内通过土壤单位横截面积上的热量基本保持不变且热量始终在向下传递,但通过的能量流量值较小。全膜平作同样保持了与露地平作相同的变化趋势,热通量保持在 35 W·m^{-2}左右,表明同样是向下传递但通过土壤单位横截面积上的热量有所增加,更多的热量被传递到深层土壤。而反观单垄覆膜和全膜双垄沟播两种模式热通量变化速率在不同深度的土层下表现均有差异,但 40 cm 土层深度都为正值说明热量传递方向始终为向下传递。在 5 cm 土层内全膜双垄沟播模式热通量急剧下降,5 cm 土层以下下降趋势开始缓解,在 40 cm 土层时甚至有变为负值的趋势。在 3 cm 土层范围内单垄覆膜模式热通量急剧下降,3 cm 土层以下下降趋势开始缓解。说明起垄后的土壤在地膜的作用下垄沟内土壤在单位时间内单位面积上通过的热量明显提高,随着土层加深热传递能力迅速减弱。其主要原因有:(1)地膜覆盖热辐射增加土壤接收的热量多,热通量累计值也增大,热量迅速向下传递,使土壤温度在很短时间内增加;(2)起垄后改变了土壤表层接收热辐射的面积,改变了土壤整体的热分布规律,使得表层土壤热量传递能力急剧增大;(3)超过一定的深度后,热辐射能力减弱,土壤接收的热量减小,热通量下降趋势逐渐减弱甚至无法接收来自表层土壤的热辐射。对比以上结果发现,10 cm 浅层土壤内全膜双垄沟播模式下垄沟内土壤热通量值最高,且热通量下降速率也最大,说明全膜双垄沟播能有效抑制垄沟内温度快速向下传递的趋势,能有效提高浅层土壤的保温性能。

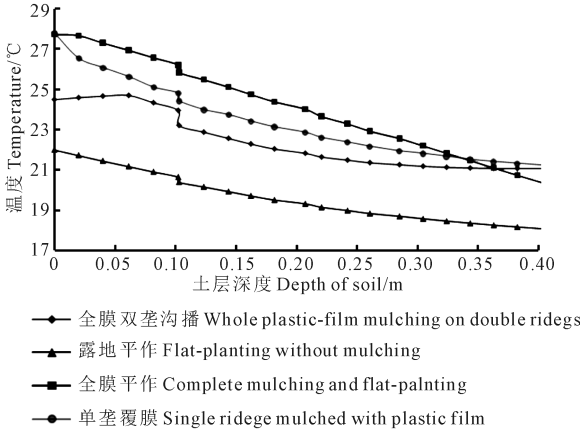


图 3　垄沟土壤温度变化

Fig.3　Temperature change in the furrow

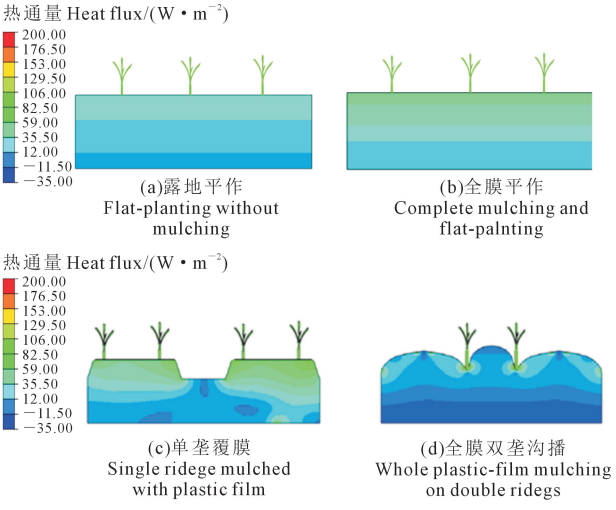


图 4　垄体土壤热通量分布状态

Fig.4　Heat flux distribution in the body of ridge

3.3　降雨入渗模拟试验

3.3.1　模型前处理及边界条件　雨水入渗的仿真模拟其重点是研究土壤在降雨结束后的水分分布和迁移特性。因此降雨边界条件要尽量接近实际降雨日变化才能得到可靠的模拟效果。采用上文中的二维平面模型选择 Mohr-Coulomb 土体本构模型,添加表 1 给出的土壤渗透系数、孔隙比、水的容重等材料参数,划分网格类型为六面体结构化网格。为了提高计算精度垄沟附近网格进行适当加密,单元类型为 CPE4P,采用 solis 分析步。

在 ABAQUS 中降雨边界条件通过降雨入渗强度 q(m·h^{-1})来表示,并且排除降雨所造成的积水现象,另外为了更好地模拟实际降雨效果,ABAQUS 中通过定义幅值曲线的方式来模拟降雨量随时间的变化[18-20]。参考相关土壤雨水入渗模拟的研究,由于土壤含水量受到降雨量影响较大,为了减小仿

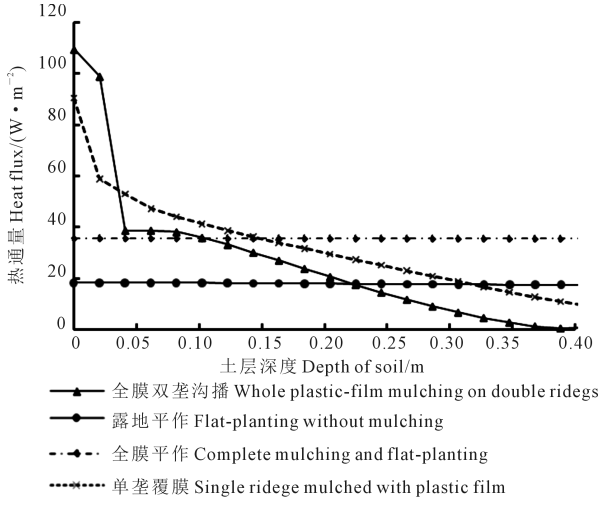


图 5　垄沟内土壤热通量变化

Fig.5　Heat flux change in the furrow

真成本,此处假设降雨时间为 72 h,降雨前模型土壤饱和度为 0,即土壤为干土。另外根据农艺要求膜上穴播时膜孔直径为 5 cm 左右,覆膜状态下降雨仅可通过膜孔入渗,地膜不透水。参考相关土壤雨水入渗仿真模拟经验定义初始入渗强度为 0.02 m·h^{-1},降雨量随时间的变化幅值曲线如图 6 所示,降雨量从 0 时刻开始达到峰值后在 72 h 后降雨停止。计算过程中软件会按照该幅值函数自动调节入渗强度大小。

3.3.2 垄体土壤渗流速度分布 雨水在土壤中的渗流主要表现为雨水在土壤骨架空隙内的流动,该运动十分复杂。通过 ABAQUS 可得到土壤渗流速度变化规律。当前处理准备完成时提交计算通过软件后处理功能即可观察垄体土壤降雨后的饱和度、孔隙压力、水分流速和体积含水率等结果。该过程旨在能够直观地观察土壤内水分的迁移规律。模拟结束后通过 ABAQUS 后处理场输出得到不同覆膜模式下降雨后土壤的雨水渗流速度分布云图,如图 7 所示,其中箭头表示雨水流速矢量。可知降雨结束后不同覆膜方式下雨水渗流速度的大小和方向差异较大。在相同的降雨边界条件下露地平作模式的雨水渗流速度大体表现为竖直向下。单垄覆膜和全覆膜平作模式下由于降雨仅能通过膜孔入渗,降雨后雨水的渗流速度明显与露地平作不同,其最大速度集中在膜孔附近。全膜双垄沟播模式下降雨仅能通过垄沟入渗,其渗流速度表现为垄沟附近大于其他位置且流速方向改变最为明显。具体表现为雨水通过垄沟时先向四周扩散然后向下入渗,有明显的侧渗现象。造成流速分布差异的主要原因是地膜覆盖导致雨水仅能通过膜孔入渗,使得降雨入渗边界被限制,以及垄体结构改变了雨水的初始流动方向。对于全膜双垄沟而言独特的垄沟集雨效应使得雨水全部集中到垄沟内并通过垄沟独特的外形结构改变了雨水入渗速度和方向,使得雨水产生了侧渗。

3.3.3 垄沟内土壤渗流速度变化 分别提取 4 种模型垄沟内土壤渗流速度得到其变化曲线(图 8)。由图 8 可知,降雨结束后露地平作和全膜平作两种模式的入渗速率变化不大,基本保持在 0.1 m·h^{-1} 左右,40 cm 深度内基本保持匀速,露地平作模式平均下渗速度略大于全膜平作模式。这说明单纯的地膜覆盖对于土壤渗流速度影响不大。而全膜双垄沟播和单垄覆膜两种模式下雨水下渗速度变化差异较为明显,具体变现为在 0~10 cm 浅层土壤内下渗速度迅速降低,超过 10 cm 土层后全膜双垄播

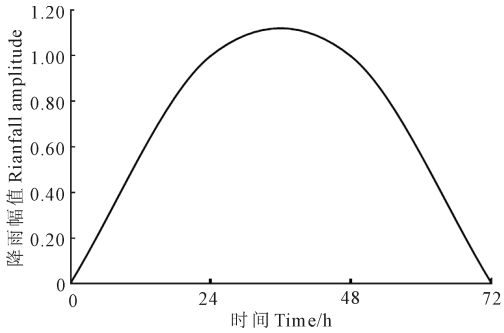


图 6 降雨幅值曲线

Fig.6 The curve of rainfall amplitude

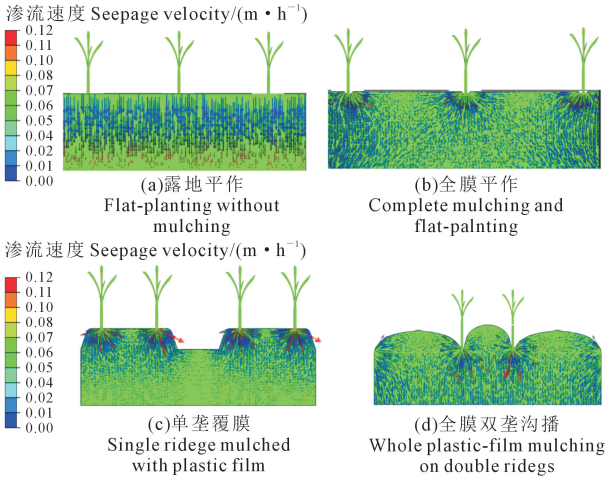


图 7 降雨结束后垄体土壤渗流速度分布状态

Fig.7 The distribution of seepage velocity in the body of ridge after rainfall

模式雨水下渗速度趋于稳定。以上结果说明不同的处理模式对土壤雨水下渗有较大的影响,起垄和地膜覆盖都抑制了雨水下渗的速度。其主要原因是起垄后的土壤由于旋耕等机具的作用使得表层土壤骨架空隙明显大于底层,降雨能迅速渗透到土骨架间隙内,随着深度的增加孔隙比下降,其入渗能力受到了限制。其次,两种起垄模式改变了雨水初始流动的方向,降雨在起初就出现了明显的侧渗现象。

3.3.4 垄体土壤饱和度分布 土壤饱和度反映了土体空隙中充满水的程度,其大小为孔隙水的体积与空隙总体积之比,对于干土其饱和度为 0,对于饱和土该值为 1[21]。图 9 所示为降雨结束后垄体土壤饱和度分布状况。当降雨结束后起垄和覆膜都对土壤饱和度有较大的影响,而对于露地平作模式降雨后 40 cm 土层土壤饱和度为 1,说明降雨后雨水充满了土壤空隙达到了完全饱和的状态。全膜平作模式表层土壤饱和度呈“W”型,达到一定深度后逐渐稳定接近饱和。单垄覆膜模式下由于降雨可通过垄沟和膜孔入渗土壤剖面饱和度在浅层有明

显的分层现象,深层土壤也处于近饱和状态。全膜双垄沟播模式下土壤剖面饱和度分布在表层表现为垄沟附近饱和度大于其他部位,深层土壤逐渐平衡但深度方向上差值较为明显。这一结果清晰反映出了不同覆膜方式下降雨结束后土壤饱和度分布状态。

3.3.5　垄沟内土壤饱和度变化　为了得到不同覆膜方式下垄沟内土壤饱和度变化规律,从 ABAQUS 后处理功能中提取垄沟内土壤饱和度得到如图 10 所示的曲线。从图中可以发现降雨结束后露地平作土壤整体处于绝对饱和状态,全膜平作在浅层有微小下降,10 cm 以下土层又恢复了饱和状态。

单垄覆膜模式下浅层土壤饱和度迅速下降,超过 2 cm 土层逐渐升高,在 23 cm 土层左右重新达到饱和状态。而全膜双垄沟播模式下土壤饱和度变化起伏较大,总体上为先降后升,直到 40 cm 土层才达到饱和状态。分析其原因主要是由于全膜双垄沟播和单垄覆膜两种模式土壤表层存在侧渗现象,导致垂直方向上雨水入渗无法达到饱和状态,使得浅层土壤垄沟内出现非饱和区域,超过一定深度后土层侧渗现象逐渐消失,雨水下渗方向重新以重力方向为主。总体来说虽然每种模式下土壤剖面饱和度变化有所差异,但在数值上始终大于 0.95,基本上很接近饱和状态,说明在相同的降雨下 4 种覆膜方式土壤饱和度差异不大。

3.3.6　垄体土壤含水率分布　土壤含水量一直是土壤水热效应研究中非常重要的观测指标[2,16]。图 11 所示为垄体土壤体积含水率分布云图,可以发现,降雨结束后垄体含水率变化有很明显的规律性,湿润的土壤和干土之间有明显的交界面,湿润锋的空间分布非常明显。露地平作模式的富集区主要在土壤表层,其他 3 种模式其富集区主要分布

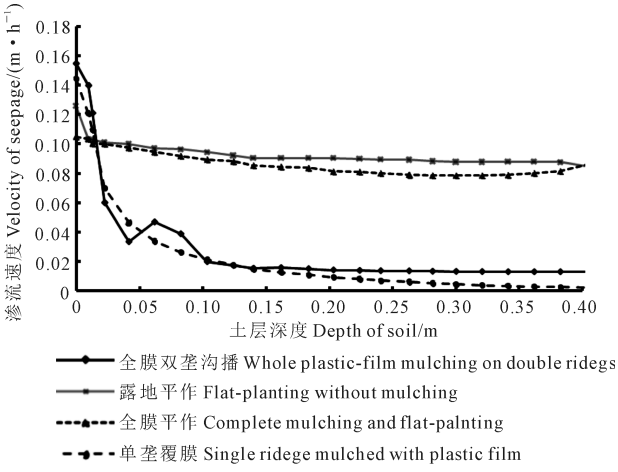


图 8　降雨结束后垄沟内土壤渗流速度变化

Fig.8　Velocity of seepage in the furrow after rainfall

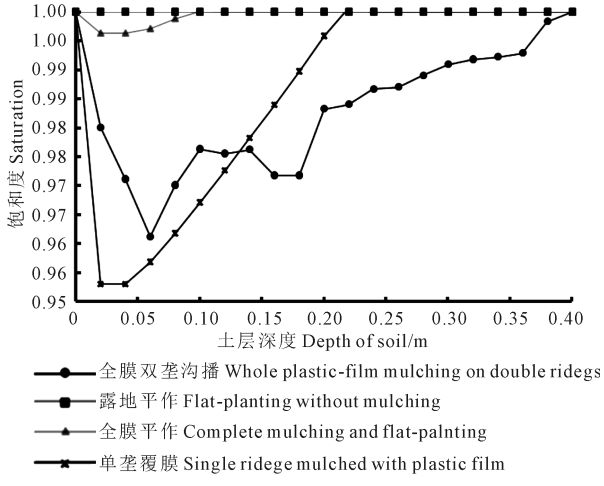


图 10　降雨结束后垄沟内土壤饱和度变化

Fig.10　Soil saturation change in the furrow after rainfall

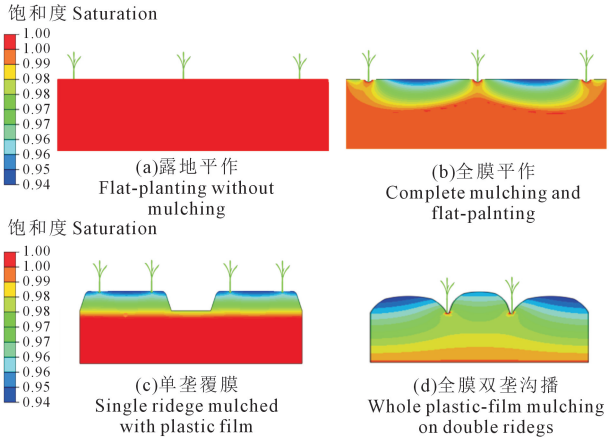


图 9　降雨结束后垄体土壤饱和度分布

Fig.9　The distribution of saturation in the body of ridge after rainfall

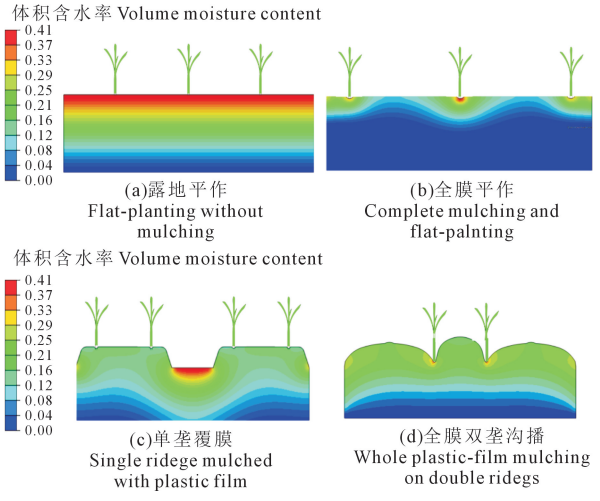


图 11　降雨结束后垄体土壤体积含水率分布

Fig.11　The distribution of soil volumetric moisture content in the body of ridge after rainfall

在膜孔或垄沟内附近,但全膜平作模式的富集区更加贴近于表层土壤膜孔附近,主要是由于地膜阻止了大量的雨水入渗,使得进入土壤的水量十分有限。在全膜双垄沟播模式下降雨经大小垄面覆盖的地膜拦截形成径流进入垄沟内,与该部位承接的自然降雨叠加造成局部水分相对丰沛从而促进水分入渗。

3.3.7 垄沟内土壤含水率变化 参考现有的农田土壤含水率研究和土壤学相关理论,含水率一般都指质量含水率,为了进一步详细研究垄沟内土壤含水率分布变化规律,此处通过土体三相组成关系将体积含水率通过下面的公式转换为质量含水率[21-23]。

$$\omega = \frac{\rho_\omega}{\rho_d}\theta_\omega \tag{7}$$

式中,ω 为质量含水率(%);ρ_d 为土壤干密度(g·cm^{-3});ρ_ω 为水密度(g·cm^{-3});θ_ω 为体积含水率。

提取垄沟内土壤体积含水率后,经过换算到质量含水率变化曲线(图 12)。如图所示,降雨后不同覆膜方式下土壤质量含水率有很大的差异,随着深度的增加质量含水率逐渐下降。全膜平作模式从26%下降到接近于 0 的状态 。主要原因是该模式下地膜阻挡了大量的降雨入渗,有限雨水只能通过膜孔进入土壤,因此大量的雨水被浪费。全膜双垄沟播模式从最高的 32%下降到 15%,平均含水率依然高于其他 3 种模式。露地平作模式含水率从 27%下降到 10%左右,单垄覆膜模式含水率较为稳定,但平均含水量较低。综合以上对比,全膜双垄沟播模式能有效提高玉米出苗期土壤含水率,尤其是 25 cm 以内表层土壤含水率。这一结果与文献[2]和文献[21]相关研究结果一致[2,20]。说明全膜双垄沟播模式能充分利用出苗期有限降雨,保水性能极佳,为玉米增产增收提供了保障。

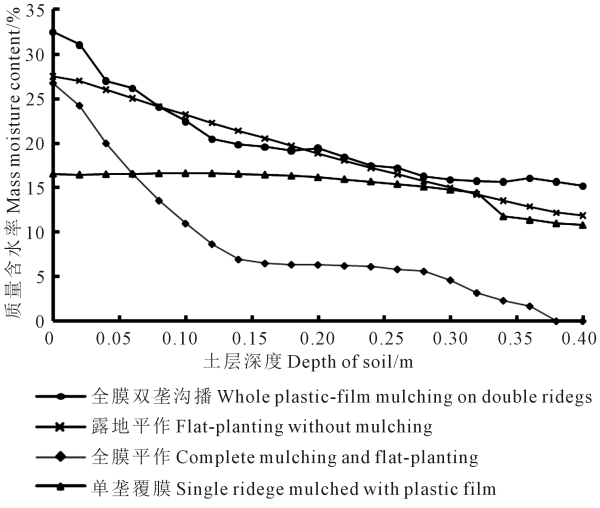


图 12 降雨结束后垄沟内土壤质量含水率变化

Fig.12 Soil mass moisture change in the furrow after rainfall

4 结 论

本文通过数值模拟的方式对玉米出苗期内全膜双垄沟播、露地平作、全膜平作、单垄覆膜 4 种覆膜方式下的土壤热平衡和降雨入渗过程进行了仿真模拟实验,得到了如下结论:

1)起垄覆膜改变了土壤剖面温度和热通量分布结构,增加了表层温度和热传递能力。垄沟内平均温度为全膜双垄沟播 22.4℃,露地平作 19.6℃,全膜平作 24.1℃,单垄覆膜 23.4℃。全膜双垄沟播模式下温度变化趋势最为缓慢,稳定性最好;全膜双垄沟播模式垄沟内热通量从 109.38 W·m^{-2}迅速下降至 0.47 W·m^{-2},且浅层土壤下降速率更快。说明全膜双垄沟播模式有效抑制了土壤温度向下传递的趋势,保证了土壤温度的长时间恒定,尤其是 25 cm 内的浅层土壤。

2)通过入渗模拟实验发现,全膜双垄沟和单垄覆膜两种模式下雨水产生了侧渗现象,其中全膜双垄沟播最为明显,渗流速度在 10 cm 土层内从 0.15 m·s^{-1}下降至 0.10 m·s^{-1},但超过 10 cm 土层后又趋于稳定,有效抑制了雨水过快下渗的趋势。其次,在含水率分布上,全膜双垄沟播和单垄覆膜模式的湿润锋富集区都集中在玉米根部(垄沟)附近。垄沟内土壤平均含水率分别为全膜双垄沟播 19.0%,露地平作 18.2%,全膜平作 8.0%,单垄覆膜 14.4%。全膜双垄沟播模式垄沟内土壤平均含水率明显高于其他 3 种模式,尤其是 20 cm 的浅层土壤内更加明显。

3)通过对比分析发现 4 种覆膜方式中全膜双垄沟播模式下垄沟内土壤温度稳定性最好,平均含水率最高,保水性和保温性最佳。

参 考 文 献:

[1] 辛尚龙,赵武云,戴飞,等.全膜双垄沟播玉米穗茎兼收对行联合收获机的研制[J].农业工程学报,2018, 34(4):21-28.

[2] 王红丽,张绪成,宋尚有,等.旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J].应用生态学报,2011, 22(10):2609-2614.

[3] 方彦杰.旱地全膜双垄沟种植对土壤温度及玉米产量的影响[J].浙江农业科学,2012,(7):942-944.

[4] 费康.ABAQUS 在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010:67-70.

[5] 丁源.ABAQUS 6.14 中文版有限元分析从入门到精通 [M].北京:清华大学出版社,2016:38-40.

[6] 陈勇,杨贝贝.基于 ABAQUS 的非饱和边坡流-固耦合分析[J].地

下空间与工程学报,2016,12(4):938-945.
[7] 齐鹏,高富强,邱立春.基于 ABAQUS 的缺口圆盘刀开沟作业有限元仿真及分析[J].农机化研究,2016,38(9):68-73.
[8] 王明,李国义.基于 ABAQUS 对岩土切削的数值模拟分析[J].机械研究与应用,2014,27(2):115-123.
[9] 康建明,李树君,杨学军,等.圆盘式开沟机作业功耗仿真分析及试验验证[J].农业工程学报,2016,32(13):8-15.
[10] 邹军,朱怡.玉米在垄作与覆膜双因子作用下的效益初探[J].耕作与栽培,2012,(1):15-16.
[11] 安治中,王伟.半干旱区全膜双垄沟播玉米栽培技术规程[J].内蒙古农业科技,2014,(6):78-80.
[12] 李志洪,赵兰坡.,窦森.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2005:121-123.
[13] 于洋,谭峰,廉琦,等.基于 ANSYS 的浅层土壤温度场特征模拟分析[J].安徽农业科学,2017,45(35):102-104.
[14] 曾德超.机械土壤动力学[M].北京:北京科学技术出版社,1990:180-183.
[15] 刘彬彬,刘尧兵,张科锋.基于 HYDRUS-1D 的不同质地土壤入渗过程数值模拟[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):140-145.
[16] 刘果果,吴礼舟.非饱和成层土一维降雨入渗水力耦合分析[J].水电能源科学,2015,33(7):66-70.
[17] 孙学保.旱地全膜双垄沟播玉米增产效应研究[D].兰州:甘肃农业大学,2009.
[18] 李亮,张宏,胡波,等.不同土壤类型的热通量变化特征[J].高原气象,2012,31(2):322-328.
[19] 王力,卫三平,吴发启.黄土丘陵沟壑区农林草地土壤热量状况及植被生长响应——以燕沟流域为例[J]. 生态学报,2009,29(12):6578-6588.
[20] 费康,彭劼.ABAQUS 在岩土工程实例详解 [M].北京:人民邮电出版社,2017:173-175.
[21] 李广信,张丙印,于玉贞,等.土力学 [M].北京:清华大学出版社,2013:19-20.
[22] 刘玉华,史纪安,王帅飞,等.垄沟集雨种植系统水分入渗特性模拟研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(6):137-144.
[23] 郭焘,于红博.土壤含水量测定方法综述[J].内蒙古科技与经济,2018,(3):66-67.

(上接第 12 页)

[23] Jamieson P D. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand [J]. Field Crops Res., 1991, 27(4):337-350.
[24] Guo S, Zhu H, Dang T, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China [J]. Geoderma, 2012, 189-190(Complete):442-450.
[25] 杨宁,孙占祥,张立桢,等.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(25):122-132.
[26] 滕晓伟,董燕生,沈家晓,等.AquaCrop 模型对旱区冬小麦抗旱灌溉的模拟研究[J].中国农业科学,2015, 48(20):4100-4110.
[27] Hsiao T C, Lee H, Steduto P, et al. 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.
[28] 李子忠,徐洋,卢宪菊,等.AquaCrop 模型在大葱生物量和土壤贮水量模拟中的应用和验证[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(4).59-66.
[29] 王罕博,龚道枝,梅旭荣,等.覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J].农业工程学报,2012, 28(22):88-94.
[30] 胡敏,苗庆丰,史海滨,等.不同地膜覆盖对春玉米生长发育及水分利用效率的影响[J].干旱区资源与环境,2017, 31(2):173-177.
[31] Zhou L, Li F, Jin S, et al. 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.
[32] 张俊鹏,刘祖贵,孙景生,等.不同水分和覆盖处理对土壤水热和夏玉米生长的影响[J].灌溉排水学报,2015, 34(2):25-28.
[33] Zhang F, Zhang W, Qi J, et al. A regional evaluation of plastic film mulching for improving crop yields on the Loess Plateau of China [J]. Agriculturalandforest meteorology, 2018, 248(5):458-468.
[34] 梁烜赫,赵鑫,陈宝玉,等. 温度对不同种植方式下玉米生长及产量的影响[J]. 分子植物育种, 2018, 16(24):8208-8213.
[35] 徐田军.低温对东北春玉米衰老和籽粒灌浆的影响及其化学调控[D].北京:中国农业科学院,2012.
[36] 张卫华. AquaCrop 模型在黄土高原夏玉米生产中的应用和验证[J].西部大开发(土地开发工程研究),2018,(2): 49-53,58.
[37] 齐伟,张吉旺,王空军,等.干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2010, 21(1): 48-52.
[38] 边超钧.陕西省玉米干旱风险评估及区划研究[D].南京:南京信息工程学院,2014.
[39] 谢军红,李玲玲,张仁陟,等.覆膜、沟垄作对旱作农田玉米产量和水分利用的叠加效应[J].作物学报,2018,44(2): 268-277.
[40] 柴守玺,杨长刚,张淑芳,等.不同覆膜方式对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J].作物学报,2015, 41(5): 787-796.