

秸秆和地膜覆盖模式下土壤水热动态分析^①

翟夏斐, 李 强, 李富翠, 王朝辉, 蒋 锐, 赵 英*

(西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要: 采用减氮追肥、垄覆沟播、秸秆还田等措施种植冬小麦, 研究其对冬小麦产量、土壤储水量、土壤水热动态变化过程及作物水分利用效率的影响。结果表明, 不同处理之间土壤水分差异显著, 不同土层土壤含水量既随降雨量波动, 又受不同覆盖栽培条件的影响。“推荐施肥+垄覆沟播”模式 0~100 cm 土壤储水量最高。不同处理之间日间土壤温度差异较小, 但温度日内变化差异较大。不同处理的增温效果为推荐施肥+垄覆沟播>推荐施肥>推荐施肥+夏闲秸秆。同对照相比, 旱地“推荐施肥+垄覆沟播”模式使小麦增产 5.25%, 水分利用效率提高 42.06%, 是适合旱地作物生产的栽培措施。HYDRUS-1D 模型模拟值同实测值拟合度较好, 可用于不同覆盖模式下土壤水热过程分析。

关键词: 冬小麦; 产量; 水分利用效率; HYDRUS-1D 模型模拟

中图分类号: S152

黄土高原旱作塬区土地面积约 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中耕地面积约 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是黄土高原重要的产粮区之一, 也是我国以生产小麦为主的古老旱作农区^[1]。该区地下水埋藏极深($>10 \text{ m}$), 很难直接补给土壤水分; 当地无灌溉条件, 农业生产主要依靠天然降水, 是典型的“雨养农业区”^[2-3]。该区降水稀少, 年降水量仅 200~700 mm, 且全年降水的 60%~70% 集中在冬小麦休闲期 7~9 月, 多以暴雨形式降落, 导致水分易于径流流失^[2], 而冬小麦生育期内(于 9 月下旬到 10 月初播种, 次年 6 月中下旬收获)的降水不足全年的一半。此外, 休闲期正是雨季与夏季高温并行、大量水分由裸土表面蒸发损失极为剧烈的时期^[3]。干旱缺水固然是影响该区冬小麦生产潜力的重要限制因素, 自然降水的大量无效蒸发则是造成现实产量低而不稳的根本原因^[4]。因此, 如何提高土壤蓄水量、降低土壤水分的无效蒸发、发挥天然降水的最大潜力、提高作物的水分利用效率是旱作农业区的重要研究课题。

近年来, 地膜覆盖和秸秆覆盖被认为是雨养农业区有效增加土壤储水量和提高作物产量的重要技术措施^[3,5]。不同覆盖模式下地表条件的改变引起土壤水分和温度的显著变化, 而土壤水热变化过程必然相互耦合, 土壤中热量的差异和改变引起水分迁移和转

化, 特别是水气的扩散^[6-9]。反过来, 土壤水分通过改变土壤热特性来影响土壤温度^[10]。然而, 以往的研究主要集中于如何从耕作制度、覆盖模式等方面减少土壤水分无效蒸发, 以期提高作物产量和水分的利用效率; 但对该模式下所形成的水热动态运移过程很少涉及^[11-12]。

目前, 国内外有关土壤水热耦合运动的研究已取得重要进展^[13-15]。国外研究者除在实验室内对封闭和蒸发条件下的模型进行修正外, 更侧重于将土壤水热运移与作物生长状况相联系, 因而发展了田间不同覆盖条件下、不同耕作措施下的土壤水热耦合运移模型^[10,16]。而国内对不同覆盖条件下田间水热运移的数值模拟^[17-20], 以及将田间水热动态由一维模型发展到二维水热迁移的数值模型^[21-22]等方面虽有研究, 但还较少。

本研究立足于上述问题, 探讨不同覆盖模式下水热动态变化过程, 准确计算土壤耗水量并探讨其与作物产量的关系, 利用模型分析黄土旱塬区不同覆盖模式下土壤水分动态和水分高效利用潜力, 为旱地作物大面积高产提供科学依据。HYDRUS-1D 模型综合考虑了水热运动、溶质运移和作物根系吸水, 适用于恒定或非恒定的边界条件, 且具有灵活的人机界面和强大的输入输出功能。故在本研究中拟采用 HYDRUS-

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001130、41201279)资助。

* 通讯作者(yzhaosoils@gmail.com)

作者简介: 翟夏斐(1989—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤物理。E-mail: lovelybububear@163.com

1D 模型模拟土壤水热耦合运移过程。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地点位于西北黄土高原丘陵沟壑区 陕西省长武县十里铺村(107°45'E、35°12'N)。该地海拔 1 200 m，年均降水量 580 mm，降水主要集中在 7-9 这 3 个月，占全年降水量的 60%~70% 以上，年均蒸发量 1 500 mm，平均气温 9.1℃，无霜期 172 天。供试土壤类型为黄绵土，土壤质地为粉壤。试验区土壤的基

本理化性状见表 1。

1.2 田间试验处理

田间试验共设 4 个处理，即农户习惯施肥(CK)、推荐施肥(JN)、推荐施肥+夏闲秸秆(JN+S)、推荐施肥+垄覆沟播(JN+PFM+S)，每个处理重复 3 次，共 12 个小区，小区面积 6 m × 22 m = 132 m²，采用随机区组排列(表 2)。供试冬小麦品种为当地主要品种“长武 521”，播种量为 150 kg/hm²，2011 年 9 月 23 日播种，2012 年 6 月 25 日收获，肥料播前一次施入，冬小麦生育期间不进行任何灌溉，播种和收获均采用机械操作。

表 1 试验区土壤基本理化性质
Table 1 Soil basic physical and chemical properties in research area

处理	土层 (cm)	砂粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	体积质量 (g/cm ³)	总孔隙度 (%)	pH
CK	0~20	281.5	711.6	6.9	1.23	53.58	7.57
	20~40	263.2	729.0	7.9	1.35	49.06	7.67
	40~60	225.3	763.4	11.3	1.42	46.42	7.60
	60~80	311.6	678.5	10.0	1.32	50.19	7.61
	80~100	310.1	683.4	6.5	1.34	49.43	7.63
JN	0~20	294.7	697.3	8.0	1.21	54.34	7.57
	20~40	332.6	659.6	7.7	1.34	49.43	7.61
	40~60	293.1	695.6	11.4	1.38	47.92	7.59
	60~80	348.4	643.0	8.5	1.32	50.19	7.58
	80~100	323.3	667.6	9.0	1.26	52.45	7.59
JN+S	0~20	341.0	654.8	4.2	1.22	53.96	7.55
	20~40	333.8	657.3	8.8	1.39	47.55	7.63
	40~60	330.0	664.0	6.0	1.40	47.12	7.65
	60~80	274.2	719.8	6.0	1.37	48.18	7.65
	80~100	343.5	649.7	6.8	1.31	50.40	7.64
JN+PFM+S	0~20	293.8	700.8	5.5	1.25	52.83	7.52
	20~40	312.8	680.7	6.5	1.39	47.55	7.60
	40~60	303.8	685.7	10.6	1.40	47.17	7.63
	60~80	299.5	691.4	9.1	1.34	49.43	7.61
	80~100	298.1	695.0	6.9	1.29	51.32	7.63

注：CK：农户习惯施肥；JN：推荐施肥；JN+S：推荐施肥+夏闲秸秆；JN+PFM+S：推荐施肥+垄覆沟播，下同。

表 2 田间试验设计
Table 2 Design of field experiment

处理	基肥与追肥	播种与管理
CK	施氮(N) 162 kg/hm ² ，施磷(P ₂ O ₅)10 ⁵ kg hm ²	常规平作，播种行距 15 cm，小麦收获时秸秆全部收走，收获后 1 周翻耕 1 次，经过夏闲后下季小麦播前 2 周，再翻耕整地 1 次，耕深均为 40 cm
JN	采用测土推荐施肥量，基肥为 N 10 ⁴ kg/hm ² + P ₂ O ₅ 10 ⁵ kg/hm ² ；追肥为 N 34 kg/hm ² ，返青前 2 月 20 日追肥	同 CK
JN+S	同 JN 处理	常规平作，播种行距 15 cm，小麦收获时秸秆全部还田，小麦播前翻耕整地一次，耕深 40 cm
JN+PFM+S	同 JN 处理	播前起垄，垄上覆膜，垄宽 35 cm，垄间沟宽 30 cm；沟内播种，行距 20 cm；小麦收获时不揭膜且秸秆全部还田，覆盖沟内；小麦播前翻耕整地一次，耕深 40 cm

1.3 模型模拟

1.3.1 模型简介 本研究中采用 HYDRUS-1D 模型模拟土壤水热动态过程。HYDRUS-1D 模型由美国盐土实验室开发,模拟非饱和介质中一维水分、热和溶质运移过程。模型模拟过程同时考虑了水蒸气运移对水分和温度运移的影响,因此模型中采用的水分和热量方程分别为方程(1)^[23]和(2)^[23]:

$$\frac{\partial \theta_T(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(K + K_{vh}) \left(\frac{\partial h}{\partial x} \cos \alpha \right) + \left(K_{LT} + K_{vT} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - S(h) \quad (1)$$

式中: θ_T 是总体积含水量 (cm^3/cm^3), 包括液态水体积含量和水蒸气体积含量; t 是时间 (d); x 是距离步长 (cm); h 是水势 (cm); α 是水流方向与垂直方向的夹角; T 是温度 ($^{\circ}\text{C}$); S 是吸收项 ($\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$); K 是液相等温导水率 (cm/d); K_{vh} 是水蒸气等温导水率 (cm/d), K_{LT} 是液相导水率 ($\text{cm}^2/(\text{C} \cdot \text{d})$), K_{vT} 是水蒸气导水率 ($\text{cm}^2/(\text{C} \cdot \text{d})$).

$$C_p(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} + L_o \frac{\partial \theta_v}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(\theta) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - C_w q \frac{\partial T}{\partial x} - C_v \frac{\partial q_v T}{\partial x} - L_o \frac{\partial q_v}{\partial x} \quad (2)$$

式中: $C_p(\theta)$ 是土壤容积热容量 ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$); C_w 是土壤液相容积热容量 ($\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$); L_o 是液态水汽化体积潜热 (J/cm^3); θ_v 是水蒸气体积含量 (cm^3/cm^3); q 是液态水通量密度 (cm/d); q_v 是水蒸气通量密度 (cm/d); $\lambda(\theta)$ 是土壤导热率 ($\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$), 可以由 Chung 和 Horton^[13]提出的简化方程得到:

$$\lambda(\theta) = b_1 + b_2 + b_3 \theta^{0.5} \quad (3)$$

式中: b_1 , b_2 和 b_3 是经验参数。

土壤容积热容量的计算方法^[24]:

$$C_p(\theta) = C_n \theta_n + C_o \theta_o - C_w \theta + C_a a_v \approx (1.92 \theta_n + 2.51 \theta_o + 4.18 \theta) 10^6 \quad (4)$$

式中: $C_p(\theta)$ 是土壤容积热容量; θ 代表体积相; 下标 n, o, w, a 分别代表固相、有机质、液相和气相。由于空气的比热容太小, 故该项可忽略不计。

1.3.2 参数率定 模拟时间为 2011 年 9 月 20 日到 2012 年 6 月 30 日, 共计 285 天。模型模拟深度为 10、30、40、60、100 cm。模拟土体下边界设在 100 cm 处, 假定为自由排水, 上边界为气象通量边界条件, 输入数据包括逐日的降水量、土壤表层和底层的温度等。其中 CK、JN、JN+S 处理的降水量为常规降水量, JN+PFM+S-沟内的降水量为常规降水量的 1.8 倍, JN+PFM+S-垄地的降水量为常规降水量的 0.2 倍。潜

在蒸散量是通过输入气象数据(日最大和最小气温、相对湿度、风速和日照时数等), 利用 Penman-Monteith 公式计算得到^[25]。输出结果包括 1 m 土体水分平衡各项和热量各项。气象数据(降雨、气温、净辐射、相对湿度、风速、蒸发量等)来源于长武站农田小气候观测系统。

根据实际测定的各层土壤水力学参数, 结合实测水分数据, 对与水分运移有关的参数进行率定, 结果见表 3。土壤热容量和导热率由前述方程计算而得。

1.4 测定项目和方法

2011 年小麦播种前采集环刀原状土, 室内采用烘干法测定土壤体积质量, 压力膜法测定土壤水分特征曲线和固定水头法测定土壤饱和导水率, 每个处理重复 3 次, 并根据 Mualem-van Genuchten 公式拟合土壤非饱和导水率^[26], 为模型模拟提供相应的参数。同时采集土壤样品, 过 2 mm 筛后, 室内利用激光颗粒分布测量仪测定土壤颗粒组成, 采用美国制分类标准对土壤粒级进行划分, 总孔隙度根据土壤密度计算得出(土壤比重为 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$), 利用 pH 计测定土壤 pH, 每个处理重复 3 次。

为验证数值模型的准确性, 本研究在田间原位测定了土壤水分和温度。采用 PR2 土壤水分速测仪 (Delta-T Devices Ltd., Cambridge) 测定剖面土壤体积含水量, 分 5 个观测深度, 依次为 10、30、40、60、100 cm, 每个深度旋转探针测定 3 个方向, 每个方向测定 3 次, 共测定 9 次, 取平均值。2011 年 10 月至 2012 年 5 月, 每 15 天测定一次; 2012 年 6 月, 每 6 天测定一次(如遇降雨, 则在降雨后两天内测定土壤水分), 每个处理重复 3 次。除 CK 处理外, 每个处理分别布设了一套 TidbiT v2 微型温度记录仪(onset computer corporation, America), 每 1 h 自动记录 10 cm 土层处温度各 1 次。此外, 为了更好地探究 JN+PFM+S 处理垄地和沟内两种微立地条件下土壤水分和温度的差异及其动态变化, 分别对沟内和垄地进行土壤水分和温度的监测。

利用 HYDRUS-1D 模型和农田土壤水量平衡方程, 计算作物生育期耗水量。由于试验地位于典型的雨养农业区, 不具备灌溉条件, 故灌溉用水量为 0; 地下水埋深为 60 m, 可视地下水补给量为 0; 其中冠层截留量可忽略不计。 ΔW 、 D 和 R_s 均由 HYDRUS-1D 模型模拟结果提供。因此, 作物生育期耗水量计算公式可改写为:

$$ET = P - \Delta W - D - R_s$$

式中: ET 为作物生育期耗水量 (mm), 包括植株蒸

表 3 HYDRUS-1D 模型中的土壤水力学参数
Table 3 Soil hydraulic parameters in HYDRUS-1D Model

处理	土层 (cm)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	K_s (cm/d)	l
CK	10	0.02	0.41	0.05	1.90	185.17	0.5
	30	0.05	0.39	0.04	1.60	107.29	0.5
	40	0.05	0.39	0.04	1.50	29.41	0.5
	60	0.05	0.38	0.06	1.25	70.43	0.5
	100	0.05	0.38	0.05	1.48	141.76	0.5
JN	10	0.02	0.40	0.05	1.95	441.24	0.5
	30	0.05	0.38	0.07	1.42	283.42	0.5
	40	0.05	0.38	0.07	1.56	81.12	0.5
	60	0.05	0.37	0.075	1.42	166.29	0.5
	100	0.05	0.37	0.07	1.42	84.98	0.5
JN+S	10	0.02	0.41	0.05	1.94	64.52	0.5
	30	0.05	0.39	0.05	1.55	43.49	0.5
	40	0.05	0.39	0.05	1.57	251.90	0.5
	60	0.05	0.38	0.07	1.30	334.88	0.5
	100	0.05	0.38	0.07	1.45	402.04	0.5
JN+PFM+S 沟内	10	0.03	0.45	0.05	1.90	224.00	0.5
	30	0.05	0.41	0.05	1.45	220.09	0.5
	40	0.05	0.41	0.05	1.42	477.74	0.5
	60	0.05	0.38	0.06	1.22	159.17	0.5
	100	0.05	0.38	0.06	1.30	187.02	0.5
JN+PFM+S 垄地	10	0.02	0.40	0.06	2.00	224.00	0.5
	30	0.05	0.39	0.04	1.55	220.09	0.5
	40	0.05	0.39	0.04	1.55	477.74	0.5
	60	0.05	0.38	0.07	1.38	159.17	0.5
	100	0.05	0.38	0.07	1.40	187.02	0.5

腾量和植株间地表蒸发量； P 为该时段降水量 (mm)； ΔW 为作物生育期内土壤储水量变化量 (mm)； D 为渗漏量 (mm)； R_s 为地表径流量 (mm)。

从而可得水分利用效率公式为：

$$WUE = Y/ET$$

式中：WUE 为水分利用效率 (kg/(hm²·mm))； Y 为作物籽粒产量 (kg/hm²)； ET 为作物生育期耗水量 (mm)。

利用 HYDRUS-1D 模型模拟不同覆盖栽培模式条件下水分和温度的运移过程，在实测数据量较小的情况下，可以很好地弥补其不足，同时该模型模拟过程考虑到水汽扩散的影响，从而可以更为准确地反映水分和温度动态变化过程。利用已验证模型的模拟结果和土壤水量平衡方程，计算作物生育期耗水量，这为准确量化不同覆盖模式下小麦耗水量和水分利用效率提供了数据保证，为不同覆盖模式的进一步优化

及水资源的高效利用奠定理论基础。

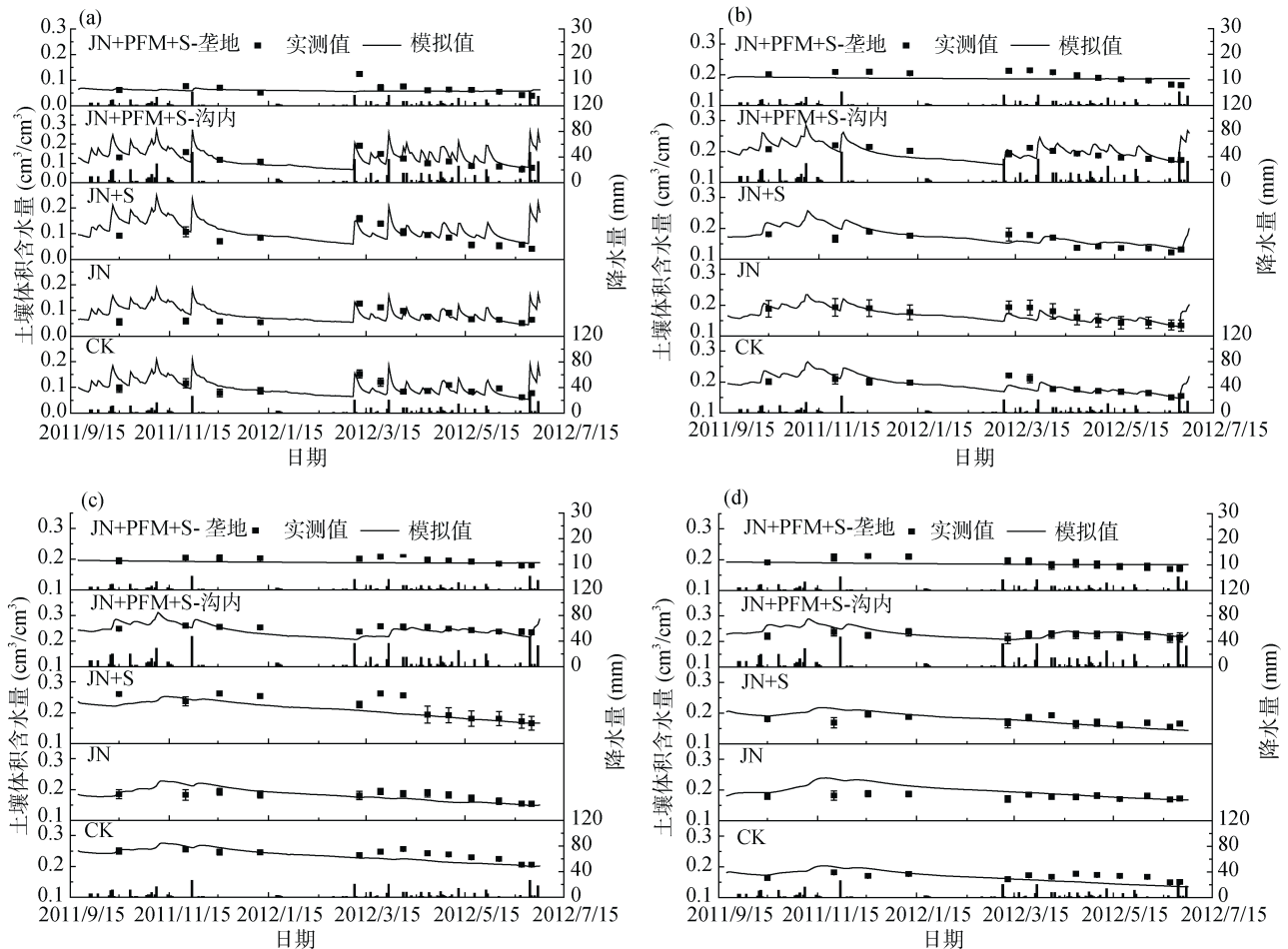
1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 软件处理数据和统计分析，采用 Origin 软件制图。

2 结果与讨论

2.1 不同覆盖模式条件下土壤水分时空动态变化

利用 HYDRUS-1D 模型模拟不同覆盖栽培模式条件下土壤水分含量动态变化，结果如图 1，冬小麦不同处理生育期内不同土层土壤含水量随降雨量波动，又受不同处理条件显著影响。所有处理土壤水分动态变化规律相同：在 10 cm 处土壤含水量最低，且变化最剧烈，而其他层次变化较为平缓。这主要是由于土壤表层受大气强烈蒸发和降水所致；其次主要与冬小麦根系生长有关，冬小麦根系主要集中在 0~10 cm 处，加剧了对土壤表层水分的消耗。



(a. 10 cm 土层, b. 30 cm 土层, c. 60 cm 土层, d. 100 cm 土层; CK、JN、JN+S 处理降水量均为常规降水量, JN+PFM+S-沟内处理降水量为常规降水量的 1.8 倍, JN+PFM+S-垄地处理降水量为常规降水量的 0.2 倍, 下同)

图 1 不同处理不同深度土壤剖面水分分布动态

Fig. 1 Soil moisture dynamics in different depths under different treatments

在出苗-分蘖期, 所有处理各土层土壤水分缓慢降低, 虽然该时期蒸散作用弱, 但降雨量显著减少。各处理水分含量均为 10 cm 处最低, 60 cm 处最高。这是由于 40 ~ 60 cm 处在土壤整个剖面体积质量最大, 总孔隙度最小, 土壤透水弱, 土壤水分在该层阻滞, 从而使得该层水分含量最高。所有处理各土层水分含量均为 JN+PFM+S 沟内最高, 说明 JN+PFM+S 处理在该时期能较好地保蓄土壤水分, 从而满足冬小麦出苗分蘖的需要。

在越冬期, 所有处理各土层土壤水分含量变化较为平缓, 由于冬季气温较低, 土壤冻结, 蒸发量减少, 故土壤水分含量较为稳定。JN+PFM+S 垄地除 10 cm 土层水分含量最低外, 其他土层水分含量差异较小, 而其他处理土壤含水量均随着土壤深度的增加而增加, 但相较于 60 cm 土层, CK 和 JN+S 处理 100 cm 处土壤含水量明显下降; 而 JN 和 JN+PFM+S 沟内 100 cm 处土壤含水量差异不显著, 说明 JN+PFM+S 处理较 JN+S 处理在越冬期保墒效果更好。

在返青期, JN+PFM+S 沟内土壤含水量最高, 明显大于 JN+S 处理。同一处理 10 cm 处土壤含水量明显增加, 因为春季气温回升, 土壤解冻后土壤表层水分含量得到有效的补给, 而其他各层土壤水分变化较小且较为平缓, 这是因为该时期冬小麦耗水较少, 蒸散作用相对较小且较为稳定。

在拔节-灌浆期, 由于降水量不多, 但蒸发和蒸腾作用较为强烈, 故该时期土壤水分含量最低。相对于 30 cm 土层, 60 cm 处 JN+PFM+S 沟内的土壤含水量增幅小于 JN+S 处理, JN+PFM+S 沟内比 JN+S 处理更多地消耗土壤深层水分, 可能是由于地膜覆盖下土壤深层水分较为充足, 作物扎根深度及根量增加, 从而加剧了对该层土壤水分的消耗。而 100 cm 处 JN+PFM+S 沟内的土壤含水量降幅小于 JN+S 处理, 这说明地膜覆盖对土壤的保墒作用优于秸秆覆盖。

从图 1 可以看出, 模型对降雨响应较为灵敏, 在降雨当天, 10 cm 处水分迅速增加。在冬小麦生育返

青期土壤含水量模拟值较实测值偏小,可能是由于春季解冻后土壤表层水分增加,而模拟时并没考虑该过程,而其他时期的模拟结果均较好。因此总体而言,可以认为该模型所模拟的不同处理土壤水分含量动态变化效果良好。

2.2 不同覆盖模式对小麦生育期耗水和水分利用效率的影响

对冬小麦生育期 0~100 cm 土壤储水量比较分析见图 2。0~100 cm 土层内 JN+PFM+S 沟内土壤储水量最高。垄上覆盖地膜,可以将有限的降水汇集至沟内,沟内同时增覆秸秆,明显降低了土壤水分无效蒸发,故土壤储水量最大。小麦生育前期土壤储水量变化较小,后期则呈下降趋势。冬小麦处于出苗和分蘖期,蒸散量不大,且有一定量的雨水补给,土壤墒情略有增加。越冬期由于气温较低,降水虽然减少,但土壤封冻,蒸发量小,土壤水分较为稳定。3 月土壤解冻后,冬小麦处于返青期,耗水仍较少,而此后冬小麦拔节-灌浆期,降水量不多,但蒸散量增加,

土壤进入明显耗水状态,冬小麦开始拔节,叶面积逐渐增大,蒸散作用逐渐增强,0~100 cm 土壤平均储水量消耗了 89.9 mm,而该时期的降水量仅为 75.2 mm,因此该时期是冬小麦耗水最多的时期,土壤储水量急剧降低^[2, 27]。

从表 4 可以看出,同 CK 处理相比,其他处理的产量和水分利用效率虽然均有一定程度的提高,但各处理间产量和水分利用效率差异均不显著。可能主要是由于 2012 年是丰水年,降雨量偏多,覆盖措施在集水保墒方面的效应减弱,导致作物产量增产幅度较低。相较于 CK 处理,JN 处理增产 8.86%,水分利用效率提高 6.93%。可见,在施氮水平较高的情况下,进行减氮追肥,在一定程度上阻止了冬小麦在生育前期过旺生长,减少了冬小麦生育前期土壤水分的过量消耗,从而保证了冬小麦后期的生长和有效提高了土壤水分的利用率^[28]。JN+S 和 JN+PFM+S 处理分别增产 8.60%和 5.25%,水分利用效率分别提高 11.23%和 42.06%,说明减氮追肥结合秸秆覆盖和地膜覆盖模式可以提高冬小麦产量和水分利用效率,其原因是秸秆覆盖可改变作物耗水模式,即在小麦生育前期能抑制土壤蒸发,减少土壤水分无效消耗;后期则增强植株蒸腾,促进干物质积累,使农田耗水方式由物理过程向生物过程转化,从而提高作物产量和水分利用效率^[29]。而地膜覆盖能够通过阻碍土壤中的水汽与空气的对流交换,蒸发的水汽凝结于膜下,水滴由于重力作用落到地表,在膜下与地表之间形成了水分的内循环,有效地减少土壤水分的无效蒸发,增加土壤水分含量。由于其增温保湿作用,有利于土壤微生物的增殖,促进土壤有机质的分解和养分的转化。同时地膜覆盖后可减少养分的淋溶、流失、挥发,可提高养分的利用率,从而提高作物产量和水分利用效率。

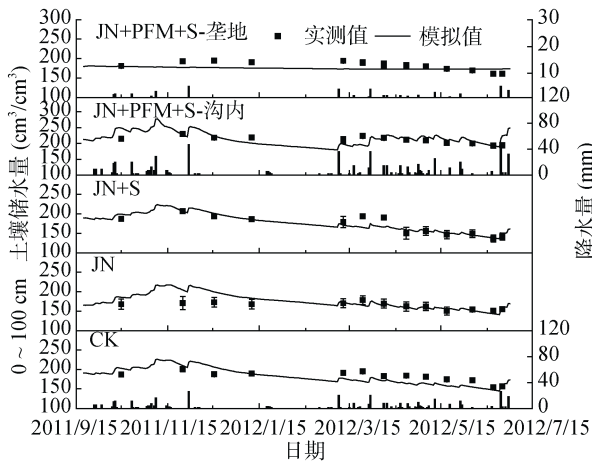


图 2 不同覆盖模式下 0~100 cm 土壤储水量动态变化
Fig. 2 Changes of 0-100 cm soil water storages under different covering modes

表 4 不同覆盖模式对生育期耗水量及水分利用效率的影响
Table 4 Effects of different covering modes on soil water consumption during growth period and on water use efficiency

处理	降水量 (mm)	储水量变化量 (mm)	地表径流量 (mm)	渗漏量 (mm)	耗水量 (mm)	产量 (kg/hm ²)	水分利用效率 (kg/(hm ² ·mm))
CK	328.0	-43.8	8.8	73.3	289.7	6 475 ± 57 a	22.35 ± 0.20 b
JN	328.0	-26.5	6.3	53.3	295.0	7 049 ± 181 a	23.90 ± 0.61 b
JN+S	328.0	-50.1	14.5	80.9	282.8	7 032 ± 239 a	24.86 ± 0.85 b
JN+PFM+S	328.0	-16.1	16.0	113.5	214.6	6 815 ± 307 a	31.75 ± 1.43 a

注: JN+PFM+S 处理的储水量变化量、地表径流量和渗漏量为 JN+PFM+S 沟内和 JN+PFM+S 垄地的平均值。同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平,下同。

2.3 不同覆盖模式对土壤温度的影响

如图 3 可见,不同处理 10 cm 处土壤日平均温度动态变化差异较小,即使在地膜覆盖的垄地,其温度

也只比沟内略高一点。地温日变化趋势基本一致,均为中午高,晚上低,但不同处理土壤温度日变化差异较为显著。白天 JN+PFM+S 垄地地温最高,与其

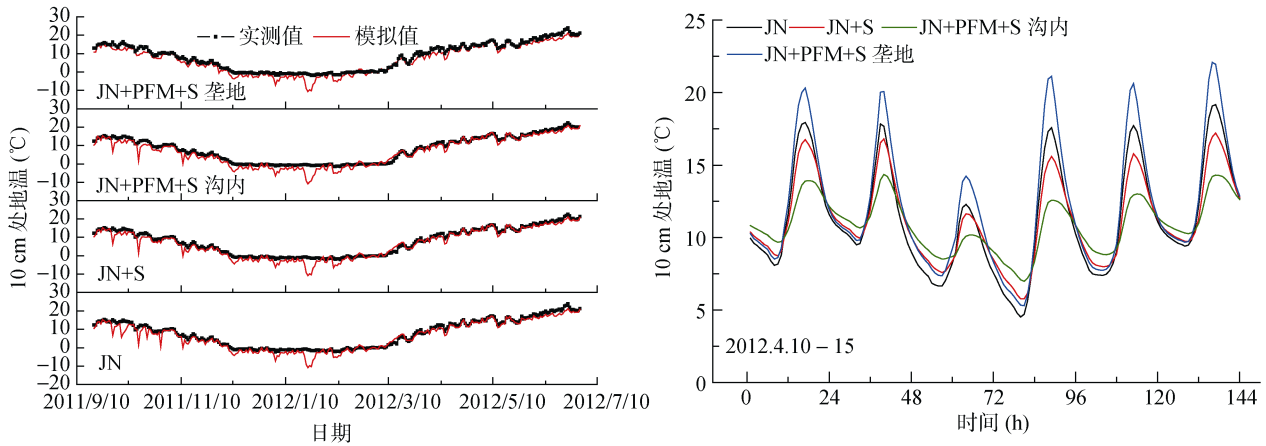


图 3 不同覆盖模式下 10 cm 处土壤日平均地温及日内动态变化

Fig. 3 Changes of soil daily mean temperature and intraday temperature dynamics with different covering modes at 10 cm soil layer

他处理均差异显著。这是由于地膜与地表之间形成的温室效应,减少土壤热量向大气散失;而且起垄后的实际地表面积要大于其他的处理,比其他处理可接受更多的阳光照射。然而,JN+PFM+S 沟内白天温度最低,说明秸秆覆盖具有明显的降低地温的作用。晚上相反,JN+PFM+S 沟内在 4 个处理中温度最高,说明晚上温度降低时,秸秆层阻挡了地面的长波辐射,减少了土壤散失热量,有效地阻碍了地温的降低。JN 和 JN+S 处理日内温度介于 JN+PFM+S 沟内和 JN+PFM+S 垄地中间,充分说明覆膜明显改变了地表热量传输和平衡。

通过对比不同处理 10 cm 处土壤温度的模拟值和实测值,二者差异较小,说明 HYDRUS-1D 模型能

够较好地模拟不同覆盖模式下土壤温度的动态变化过程。

从表 5 中可以看出,JN+PFM+S 垄地 $>0^{\circ}\text{C}$ 积温除分蘖期外始终是最高的,说明地膜覆盖使得土壤的增温效果最为显著。JN+S 和 JN+PFM+S 沟内在出苗期和分蘖期的耕层 >0 的积温高于 JN 处理,这在一定程度上,有利于冬小麦的出苗和分蘖,而在冬小麦拔节后后期至成熟期的耕层 >0 的积温低于 JN 处理。冬小麦开始拔节,叶面积指数逐渐增大,致使土壤遮阴率提高,加之覆盖条件下高温时有“降温效应”^[30],故该时期内土壤温度降低,但并未对作物产量造成影响,相反,这一“降温作用”有助于减少土壤的无效蒸发,从而提高作物的水分利用效率。

表 5 不同覆盖模式对 10 cm 处 $>0^{\circ}\text{C}$ 积温的影响($^{\circ}\text{C}$)

Table 5 Effects of different covering modes on $>0^{\circ}\text{C}$ accumulative temperature at 10 cm soil layer

处理	出苗期	分蘖期	越冬期	返青期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	产量(kg/hm ²)
JN	262.83	61.99	-76.16	2.36	217.99	253.07	469.18	492.76	7 049 ± 181 a
JN+S	267.09	65.26	-64.93	1.99	213.69	250.13	462.21	471.92	7 032 ± 239 a
JN+PMF+S 沟内	282.17	75.15	-38.07	0.32	220.11	244.39	458.06	468.70	6 815 ± 307 a
JN+PMF+S 垄地	286.29	72.25	-52.65	7.51	266.38	265.78	475.01	498.55	—

由于越冬期土壤温度较低,因此,我们将冬小麦越冬期间日平均 0°C 的温度求和,即越冬期负积温^[31],作为土壤热量状况的评价指标。从表 5 中可以看出,越冬期负积温 JN+PFM+S 沟内最高,JN+S 处理次之,JN 处理最低。JN 处理地表裸露,当气温降低时,使得土壤热量易向大气散失。而 JN+PFM+S 沟内由于起垄后可以减少垄沟散热,而且低温时,秸秆覆盖也对垄沟有“增温效应”^[30]。因此,JN+PFM+S 沟内在越冬期保温效果最好,有利于小麦苗的安全越冬。

3 结论

利用 HYDRUS-1D 模型模拟,结合田间监测数据,可以较好地反映不同覆盖模式下土壤水热动态过程。结果表明在施氮水平较高的情况下,进行减氮追肥,同时结合垄覆沟播的栽培模式,能更有效地提高土壤储水量,减少水分的无效蒸发,促进干物质的积累和形成,同时地膜覆盖在冬小麦生长前期的增温效果,有利于小麦的出苗和分蘖,保证小麦苗的安全越冬,从而提高冬小麦产量和水分利用效率。因此,减氮追肥+垄覆沟播模式是适合旱地作物生产的集成栽

培措施,符合高产高效的栽培目标和旱地农业可持续发展的方向。

参考文献：

- [1] 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作冬小麦增产潜力研究[J]. 自然资源学报, 2000, 15(2): 143-148
- [2] 王晓峰, 田霄鸿, 陈自惠, 陈辉林, 王朝辉. 不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1105-1111
- [3] 张树兰, Lars L, 同延安. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 20-24
- [4] 廖允成, 郑锦娟, 温晓霞, 韩思明. 渭北塬区旱地小麦高产高效栽培模式探讨[J]. 麦类作物学报, 1999, 19(6): 61-65
- [5] 张正茂, 王虎全. 渭北地膜覆盖小麦最佳种植模式及微生境效应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 55-60
- [6] 林家鼎, 孙菽芬. 土壤内水分流动、温度分布及其表面蒸发效应的研究—土壤表面蒸发阻抗的探讨[J]. 水利学报, 1983(7): 1-8
- [7] 孙菽芬. 土壤内水分流动及温度分布计算——耦合型模型[J]. 力学学报, 1987, 19(4): 374-380
- [8] 王小平, 张谋草, 郭海英, 王宁珍, 黄斌. 利用地面遥感仪器对土壤水分的监测试验[J]. 干旱气象, 2005, 23(4): 57-60
- [9] 刘树华, 蔺洪涛, 胡非, 梁福明, 王建华, 刘和平. 土壤-植被-大气系统水分散失机理的数值模拟[J]. 干旱气象, 2004, 23(3): 1-10
- [10] 孙昭萱, 张强, 王胜. 土壤水热耦合模型研究进展[J]. 干旱气象, 2009, 27(4): 373-380
- [11] Wang H, Zhang L, Dawes WR, Liu C. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain — measurements and modeling[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(2): 151-167
- [12] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19
- [13] Chung S, Horton R. Soil heat and water flow with a partial surface mulch[J]. Water Resources Research, 1997, 23(12): 2175-2186
- [14] Flerchinger GN, Sauer TJ, Aiken RA. Effects of crop residue cover and architecture on heat and water transfer[J]. Geoderma, 2003, 116(1): 217-233
- [15] Dahiya R, Ingwersen J, Streck T. The effects of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1-2): 52-63
- [16] 韩晓非, 柳云龙, 吕军, 俞立中. 土壤水热耦合运移数值模型研究进展[J]. 土壤通报, 2001, 32(4): 151-154
- [17] 隋红建, 曾德超, 陈发祖. 不同覆盖条件对土壤水分分布影响的计算机模拟: I. 数学模型[J]. 地理学报, 1992, 47(1): 74-79
- [18] 康绍忠, 刘晓明, 张国瑜. 作物覆盖条件下田间水热运移的模拟研究[J]. 水利学报, 1993(3): 11-17, 27
- [19] 孙景生, 陈玉民, 康绍忠, 熊运章. 夏玉米田水热耦合运移的数值模拟[J]. 灌溉排水, 1995, 14(3): 24-29
- [20] 郭庆荣, 李玉山. 非恒温条件下土壤中水热耦合运移过程的数学模拟[J]. 中国农业大学学报, 1997, 12(增刊): 33-38
- [21] 隋红建, 曾德超, 陈发祖. 不同覆盖条件对土壤水分分布影响的计算机模拟: II. 有限元分析及应用[J]. 地理学报, 1992, 47(2): 181-187
- [22] 任理, 张瑜芳, 沈荣开. 条带覆盖下土壤水热动态的田间试验与模型建立[J]. 水利学报, 1998(1): 77-85
- [23] Satio H, Simunek J, Mohanty B. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(2): 784-800
- [24] van Wijk RW. Physics of Plant Environment[M]. North Holland: Amsterdam Company, 1963: 210-235
- [25] Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 300
- [26] van Genuchten MTh. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898
- [27] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 晋小军, Li GD, Chan KY. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2326-2332
- [28] 朱自玺, 赵国强, 邓天宏, 方文松, 付祥军. 秸秆覆盖麦田水分动态及水分利用效率研究[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 36-39
- [29] 薛澄, 王朝辉, 李富翠, 赵护兵, 周玲, 李小涵. 渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21): 4395-4405
- [30] 姚宝林, 施炯林. 秸秆覆盖免耕条件下土壤温度动态变化研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 1128-1129, 1132
- [31] 陈继康, 李素娟, 陈阜, 张海林. 华北平原免耕土壤积温征对冬小麦的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 547-551

Soil Water and Heat Dynamic Analysis Under Straw and Plastic Film Mulching Modes

ZHAI Xia-fei, LI Qiang, LI Fu-cui, WANG Zhao-hui, JIANG Rui, ZHAO Ying*

(College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of different covering cultivation modes on winter wheat yield, soil water storage, soil water and heat coupling processes and water use efficiency in the dry land of loess plateau. The experiment consisted of four treatments: conventional fertilization (CK), recommended fertilization (JN), recommended fertilization + straw mulching (JN+S), recommended fertilization + plastic film mulching on soil ridges and straw mulching in furrows (JN+PFM+S). The results showed that there are significantly different in soil moisture contents among all the treatments, and soil water content of different soil layers fluctuated with rainfall and was influenced by different covering cultivation modes. JN+PFM+S treatment had the highest water storage. Soil daily mean temperature differences were very small among all the treatments, but the intraday temperature changes were significantly different, and warming effects of different treatments were $JN+PFM+S > JN > JN+S$. Compared with the CK treatment, the wheat yield was increased by 5.25% and water use efficiency was increased by 18.85% in the JN+PFM+S treatment. In summary, JN+PFM+S treatment was considered to be suitable mode for the crop production in the local region. HYDRUS-1D model is capable of simulating soil water content dynamics well, so it can be used for analyzing soil water and heat processes between different covering cultivation modes.

Key words: Winter wheat, Wheat yield, Water use efficiency, HYDRUS-1D model