文章编号:1000-7601(2019)05-0001-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.01

灌水量及可降解膜覆盖对滴灌玉米土壤呼吸及产量的影响

王风姣[1,2],王振华[1,2],李文昊[1,2]

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘　要:以小区试验,设置 3 个灌水水平(W1:4 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$,W2:5 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$,W3:6 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$),2 种可降解膜(M1:诱导期 60 d,M2:诱导期:80 d)和普通塑料地膜(M3),研究不同处理对滴灌玉米土壤呼吸速率及其影响因子、产量等指标的影响。结果表明:各处理土壤呼吸速率日变化呈单峰型曲线,在 14∶00 出现最高值;土壤呼吸速率自苗期至成熟期呈先升高后降低的变化趋势,抽雄期 W2M3 取得最大值 7.89 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。土壤呼吸速率与土壤温度、气温均呈显著正相关关系,与土壤含水率无相关关系。土壤温度敏感系数(Q_{10})变化范围 1.584~2.034,玉米生育期内土壤呼吸总量变化范围是 17.75~23.44 $t \cdot hm^{-2}$,籽粒产量变化范围是 11.60~12.81 $t \cdot hm^{-2}$。W2M3 的 Q_{10} 为 2.034、土壤呼吸总量为 23.44 $t \cdot hm^{-2}$、产量为 12.81 $t \cdot hm^{-2}$、收益为 6 815 元 $\cdot hm^{-2}$,均达到最大值;但其 iWUE 为 2.28 $kg \cdot m^{-3}$、经济-环境效益为 1.83 $kg \cdot kg^{-1}$,均未达到最大值。iWUE 在 W1M2 取得最大值为 2.51 $kg \cdot m^{-3}$,W2M2 经济-环境效益最优为 1.42 $kg \cdot kg^{-1}$。通过综合分析土壤呼吸总量、籽粒产量、经济—环境效益值、收益、iWUE 的关系模型,认为最优灌水量为 5 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$,诱导期为 80 d。

关键词:玉米;滴灌;灌水量;可降解膜;土壤呼吸;产量

中图分类号:S513;S157.4　　**文献标志码**:A

Effects of irrigation amount and degradable membrane mulching on soil respiration and yield of drip-irrigated corn

WANG Feng-jiao[1,2], WANG Zhen-hua[1,2], LI Wen-hao[1,2]

(1. *College of Water & Architectural Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832000, *China*;
2. *Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832000, *China*)

Abstract: In order to investigate the relationship between irrigation amount and degradable membrane on the dynamic changes of soil respiration in drip irrigation field and its influencing factors and yield, a suitable degradable membrane and irrigation amount were sought. In the plot test, three irrigation levels were set as W1: 4 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$, W2: 5 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$ and W3: 6 625 $m^3 \cdot hm^{-2}$, and two degradable membranes as M1: induction period of 60 d, M2: induction period of 80d and ordinary plastic mulch (M3). We studied the effects of different treatments on soil respiration rate, its influencing factors, yield, etc. The results showed that the daily change of soil respiration rate showed an unimodal change, and the highest value appeared at 14:00. The soil respiration rate increased first from the seedling stage to the mature stage, and the maximum value of the W2M3 was 7.89 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. There was a significant positive correlation between soil respiration rate and soil temperature and air temperature, and no correlation with soil moisture content. The soil temperature sensitivity coefficient Q_{10} varied from 1.584 to 2.034. The soil respiration total range during the maize growth period ranged from 17.75 to 23.44 $t \cdot hm^{-2}$, and the grain yield ranged from 11.60 to 12.81 $t \cdot hm^{-2}$. The Q_{10} of W2M3 was 2.034, the total amount of soil respiration was 23.44 $t \cdot hm^{-2}$, the yield was 12.81 $t \cdot hm^{-2}$, and the economic return was 6 815 yuan $\cdot hm^{-2}$,

收稿日期:2018-11-06　　**修回日期**:2019-08-22

基金项目:中国工程院院士咨询研究项目(2018-XY-36);兵团节水灌溉试验计划项目(DTJSSY-201808)

作者简介:王风姣(1988-),女,山东临朐人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术研究。E-mail:sdwfj2016@163.com

通信作者:王振华(1979-),男,河南扶沟人,教授,博士生导师,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail:wzh2002027@163.com

which both reached the maximum values; but iWUE was at 2.28 kg · m^{-3} and was the maximum and the economic-environmental benefit was 1.83 kg · kg^{-1}, which was not optimal. The maximum value of iWUE in W1M2 was 2.51 kg · m^{-3}, and the economic-environmental benefit of W2M2 was optimally at 1.42 kg · kg^{-1}. Through comprehensive analysis of soil respiration total, grain yield, economic-environmental benefit value, income, iWUE relationship model, the optimal irrigation amount was 5 625 m^3 · hm^{-2}, and the induction period was 80 d.

Keywords: corn; drip irrigation; irrigation amount; degradable membrane; soil respiration; yield

土壤是陆地生态系统最大的碳库[1],土壤碳库是大气碳库的 4 倍。土壤中碳元素的吸收和释放离不开土壤呼吸作用,土壤呼吸作用是一种复杂的生物化学过程[2],它受到生物因子、非生物因子以及人为因素的影响,而土壤的温度和湿度是影响土壤呼吸作用的关键因素。从全球范围来看,土壤呼吸作用中碳的释放速率要比人类活动中碳的释放速率高一个数量级,因此土壤呼吸的微弱变化会严重打破大气中 CO_2浓度的平衡。而以土壤为基础的农田生态系统的碳含量非常可观,对农田生态系统中的土壤呼吸进行定量的研究,这对构建全球碳循环模式,预测未来全球气候变化,发展低碳农业具有十分重要的意义。

玉米是世界三大粮食作物之一,具有饲料和工业等多种用途,玉米产量约占全国粮食产量的 25%[3],为全球的经济社会发展做出卓越的贡献[4]。西北地区玉米种植面积和年产量已经占到全国份额的 50%。2016 年新疆玉米播种面积达到 9.19 万 hm^2,占农作物播种总面积的 14.78%,2016 年新疆玉米产量达 663.87 万 t,占新疆粮食总产量的 44.54%。新疆农业用水占新疆用水总量的 90%以上[5]。翟超等[6]研究发现玉米生育期所需的灌水量为 3 570~6 370 m^3 · hm^{-2},玉米产量在 13 061~14 929 kg · hm^{-2}范围内,随着灌水量的增加,玉米产量有先增后减的趋势。

1996 年新疆推广膜下滴灌技术至今,膜下滴灌应用面积已达 2.0×10^6 hm^2,极大地推动了新疆地区农业的发展[7]。但是随着地膜的长期应用,地膜残留污染成为影响新疆农业发展的一个重大问题,严昌荣等[8]指出连续 10 a 膜下滴灌棉田残膜为(259±36.78) kg · hm^{-2};残膜影响根对水肥吸收、影响土壤呼吸、改变土壤结构、降低出苗率和作物产量[9]。可降解膜的使用是解决残膜污染的有效途径,2014 年新疆地区推广应用的可降解膜施用面积为 3 720 hm^2,可降解膜的未来应用面积会逐渐增加。长期以来,针对新疆灌水量和可降解膜对膜下滴灌玉米土壤呼吸的研究较少,本文通过大田试验,研究不同灌水量和可降解膜对滴灌玉米土壤呼吸及各因子之间的关系,并考虑产量等因素,以期为可降解膜的推广和水分的高效利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4 月—2018 年 10 月在现代节水灌溉兵团重点实验室暨新疆石河子大学节水灌溉试验站(85°59′E、44°19′N,海拔 451 m)进行,具体位置见图 1。试验站位于石河子市西郊石河子大学农试验场二连,平均地面坡度为 6‰,年均日照数为 2 865 h,多年平均降水量 207 mm,玉米生育期日均气温为 26.61℃(图 2),平均蒸发量 1 660 mm,年均温 7.7℃,其中>10℃积温为 3 463.5℃,>15℃积温为

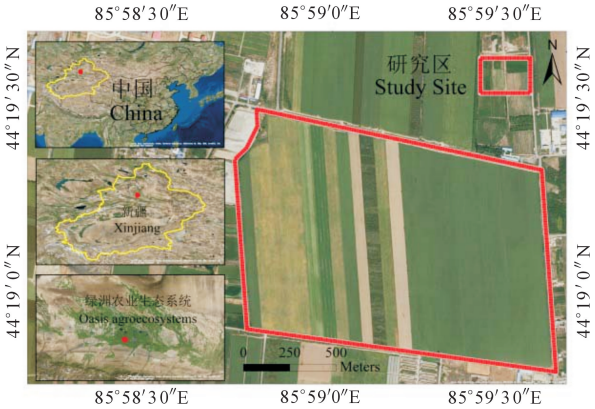

图 1 试验区位置

Fig.1 Test area location

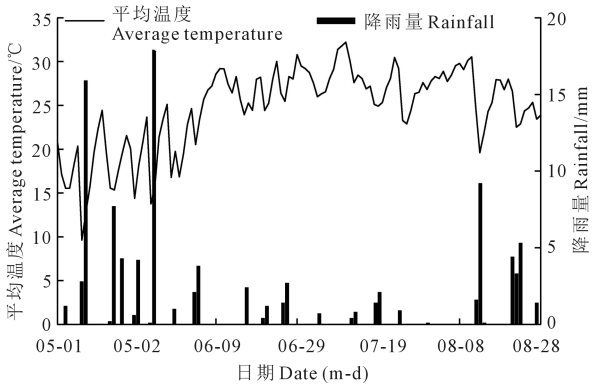

图 2 玉米生育期日均温和降雨量

Fig.2 Daily average temperature and rainfall during corn growth period

2 960.0℃,无霜期 170 d,地下水埋深大于 10 m,土壤质地为中壤土,0~100 cm 平均干容重为 1.60 g·cm^{-3},田间持水率(质量含水率)18.65%。

1.2　试验方法

本试验以玉米品种“新玉 66”为研究对象,播种时间为 5 月 1 日,种植模式为一膜两管四行(图 3),膜宽为 1.45 m,毛管间距为 60 cm,行距为 30 cm,株距为 20 cm,理论株数为 82 500 株·hm^{-2},播种深度为 3~4 cm。采用小区试验,每个小区规格为 5 m×4.5 m(长×宽)= 22.5 m^2。试验用完全生物降解膜(地膜主要成分为 PBAT,分别标记为 M1、M2),由广州金发科技有限公司提供。M1 厚度为0.01 mm,诱导期为 60 d,M2 厚度为 0.01 mm,诱导期为 80 d。普通聚乙烯塑料地膜(M3)由新疆天业公司提供,M3 厚度为 0.01 mm。灌水设置 3 水平:灌溉定额分别为 4 625、5 625、6 625 m^3·hm^{-2}(分别记为 W1、W2、W3),共 9 个处理,设 3 次重复。全生育期灌水 10 次,灌水次数、灌水定额依据翟超等方法[6]并参阅石河子及周边农场近年滴灌玉米灌溉水平实际定额制定。P_2O_5:120 kg·hm^{-2}、K_2O:90 kg·hm^{-2} 全部做基肥,尿素 20%做基肥,在播前深翻入土,每次施肥量参照大田施肥量,用施肥罐随水施肥,各生育期具体灌水、施肥量见表 1。滴灌带选用单翼迷宫式滴灌带(新疆天业公司生产),外径 16 mm,壁厚 0.3 mm,滴头间距 30 cm,滴头流量 2.6 L·h^{-1}。由足够动力的出水桩供水,各处理用水表控制灌水量。

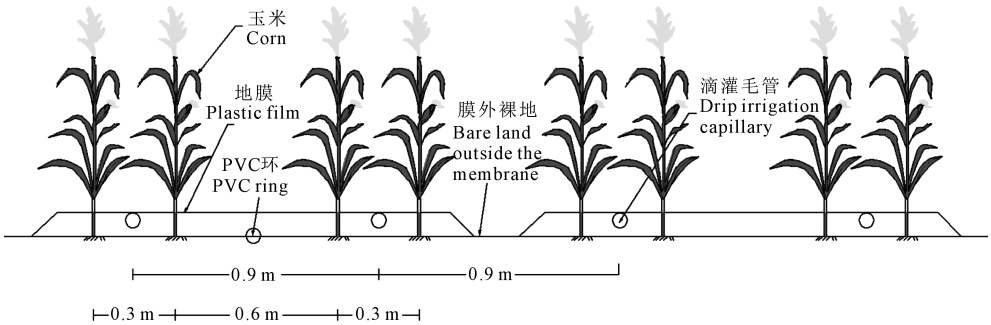

图 3　玉米种植模式图

Fig.3　Corn planting pattern

表 1　玉米各生育期灌水施肥处理

Table 1　Maize irrigation and fertilization treatment

生育期 Growth period	天数 Number of days/d	灌水、施肥周期 Irrigation, fertilization cycle/d	灌水、施肥次数 Irrigation and fertilization times	灌水、施肥比例 Irrigation and fertilization ratio/%
苗期 Seedling stage	35	30	1	10
拔节期 Jointing stage	30	10	3	20
抽雄期 Tasseling stage	21	7	3	45
灌浆期 Filling stage	20	10	2	15
成熟期 Mature stage	17	15	1	10
全生育期 Whole growth period	123	123	10	100

1.3　测试项目及方法

1.3.1　气象数据　试验站设置自动气象站(TRM-ZS2 型),每分钟记录气温、降雨量、空气湿度、太阳辐射等。

1.3.2　土壤呼吸　土壤呼吸的测量仪器为 LI-8100A(LI-8150,USA)土壤碳通量自动测量系统,该系统连接多个气室,其中长期测量气室为 9 个。进行长期定点测定土壤呼吸。于试验前 1~2 d,将 PVC 土壤环分别插入不同处理的土壤中(具体位置见图 3),嵌入土中,露出地面 3~5 cm,保证测量气室的密闭性,并清除土壤环中的杂物,稳定 24 h 以后进行第一次测量,尽可能减少土壤扰动及地上植被呼吸影响测量结果。在 5 月 2 日开始测定,每隔 4 min 获取一次数据,测量顺序按小区依次测定,并计算各处理日均土壤呼吸速率。土壤呼吸测定的同时采用仪器自身配置的 6000-09TC 电阻型土壤温度探针测量 5 cm 处土壤温度和 EC-5 土壤湿度传感器测量 10 cm 深度的土壤体积含水率,并用曲管地温计和取土烘干法对传感器所测数据进行校准。

1.3.3　土壤碳累积排放量　根据涂纯等[10]作物生长季土壤碳累积排放量的公式计算:

$$R = \sum [(R_i + R_{i+1})/2] \times 60 \times 60 \times 24 \times 12 \times 10^{-8} \times n \quad (1)$$

式中,R 为土壤碳累积排放量(t·hm^{-2});R_i 和 R_{i+1} 为第 i 次和第 $i+1$ 次日均土壤呼吸速率(μmol·m^{-2}·s^{-1});n 为相邻两次间隔天数(d),一般 $n = 5$,如遇

降雨、灌水等日均土壤呼吸速率差异较大时,适当调整;60 × 60 × 24 表示将时间 s 转化为 d;12 为碳的摩尔质量。

1.3.4 籽粒产量、灌溉水分利用效率 玉米成熟期内,在各小区随机取样,每小区取 5 个点,每个点连续取 5 株玉米,分别测量单株穗长、穗粗、穗质量,然后对玉米穗进行脱粒,并将籽粒风干后称重(称其百粒质量和总粒质量),进而折算成每公顷产量。灌溉水分利用效率($iWUE$,kg · m^{-3})以每个处理的总产量和总灌溉量之比表示[11-12]。

1.3.5 经济—环境效益值计算 作物产量可用来表征农田的经济效益,而旱作农田土壤碳释放的形式主要为 CO_2[13],环境效益主要是影响大气 CO_2浓度。因此通过参照之前的研究[14],本研究在计算经济—环境效益值时,采用土壤呼吸累积释放总量与玉米产量比值得出,计算公式如下:

$$E = R/Y \tag{2}$$

式中,E 为经济环境效益值,表示生产 1 kg 籽粒,农田释放出 CO_2的量(kg · kg^{-1})。

1.3.6 R^2 与 Q_{10}的计算 R^2 是拟合方程的决定系数,R^2 的值越接近 1,说明拟合方程的准确性越高。土壤呼吸温度敏感系数 $Q_{10} = e^{10b}$,b 为土壤呼吸速率与土壤温度指数方程 $y = ae^{bt}$中的拟合参数。

1.4 数据处理

通过 Microsoft Excel 2016 进行数据计算,通过 Origin 2017 进行作图,用 SPSS 22 进行双因素方差分析及回归分析。

2 结果分析

2.1 不同处理下滴灌玉米地膜降解程度

表 2 是不同灌水量和可降解膜处理玉米生育期内地膜的降解程度分级。覆膜 50 d 时,W1M1、W2M1、W3M1 呈现初始裂纹,其他处理未出现裂纹。覆膜 70 d 时,W1M1、W2M1、W3M1 中田间 25%的地膜呈现细微裂纹,W1M2、W2M2、W3M2 呈现初始裂纹,W1M3、W2M3、W3M3 未出现裂纹。覆膜 130 d 时,W1M1、W2M1、W3M1 地膜均呈现均匀网状裂纹,大块地膜已不存在,W1M2、W2M2、W3M2 地膜呈现 2~2.5 cm 裂纹,W1M3、W2M3、W3M3 地膜开始呈现细微裂纹(该现象为正常损耗),M1、M2 两种可降解地膜降解程度受灌水量因素影响不大,两类地膜实际降解速率均在诱导期之前开始降解,但在玉米生长前期均可保持良好的形态,生长期之后均出现不同程度的降解,在玉米收获之后可以土地直接耕作,不需耗费人力物力进行地膜回收。

表 2 不同处理地膜降解程度分级

Table 2 Classification of degradation degree of different treatments

处理 Treatment	覆膜后天数 Days after mulching/d					
	30	50	70	90	110	130
W1M1	0	1	2	2	3	4
W1M2	0	0	1	2	2	3
W1M3	0	0	0	1	1	1
W2M1	0	1	2	2	3	4
W2M2	0	0	1	2	2	3
W2M3	0	0	0	1	1	1
W3M1	0	1	2	2	3	4
W3M2	0	0	1	2	2	3
W3M3	0	0	0	1	1	1

注:0 级表示未出现裂缝;1 级表示开始出现裂纹;2 级表示田间 25%地膜出现细小裂纹;3 级表示地膜出现 2~25 cm 裂纹;4 级表示地膜出现均匀网状裂纹,无大块地膜存在;5 级表示地膜裂解为 4 cm ×4 cm 以下碎片。

Note: 0 indicates that no cracks appear; level 1 indicates that cracks begin to appear; level 2 indicates that 25% of the film in the field has small cracks; level 3 indicates that the film has 2 to 25 cm cracks; level 4 indicates that the film has uniform network cracks, no large block mulch exists; grade 5 indicates that the mulch is cracked into pieces of 4 cm × 4 cm or less.

2.2 不同处理下滴灌玉米土壤呼吸速率及其影响因素

2.2.1 不同处理下滴灌玉米土壤呼吸速率的日变化 表 3 是玉米抽穗期(7 月 20 日)土壤呼吸速率日变化特征,不同的灌水量和可降解膜的滴灌玉米土壤呼吸速率日变化过程一致,均呈单峰曲线。地膜、灌水量和地膜对土壤呼吸速率日变化影响极显著($P<0.01$),灌水量对土壤呼吸速率日变化影响不显著($P>0.05$)。

由表 3 可知,土壤呼吸速率自 10:00~14:00 逐渐升高,自 18:00~6:00 逐渐降低,高峰出现在 14:00,低谷出现在 6:00,这是由于气温引起的,午后 14:00 气温最高,日出前后气温最低。10:00 的土壤呼吸速率很接近日均值,这与前人研究结果一致[15]。抽穗期玉米土壤呼吸速率在 W2M3 取得日最大值,为 10.12 μmol · m^{-2} · s^{-1}。同一灌水水平下,土壤呼吸速率随着地膜诱导期的延长逐渐增大,各处理之间差异显著($P<0.05$),这是由于地膜诱导期越长保水保温效果越好引起的。同一地膜,在不同灌水水平下,土壤呼吸速率差异不显著($P<0.05$)。在 W2 灌水水平下,14:00 的土壤呼吸速率 W2M3 比 W2M1、W2M2 高 4.44%、1.61%。

2.2.2 不同处理下滴灌玉米土壤呼吸速率的季节变化 各处理对玉米 6 月 5 日(苗期)、7 月 5 日(拔

节期)、7 月 24 日(抽雄期)、8 月 13 日(灌浆期)、8 月 29 日(成熟期)土壤呼吸速率的变化及方差分析见表 4。单因素的灌水量对土壤呼吸速率各季节变化的影响达到显著水平($P<0.05$),地膜、灌水量和地膜对土壤呼吸速率各季节变化的影响达到极显著水平($P<0.01$)。单因素的灌水量对土壤呼吸速率不同生育期的变化影响达到显著水平($P<0.05$),地膜、灌水量和地膜对土壤呼吸速率不同生育期的变化影响达到极显著水平($P<0.01$)。

由表 4 可知,各处理玉米生育期的土壤呼吸速率动态变化相似,随着生育期的推进,土壤呼吸速率呈先上升后下降的变化趋势,在玉米生长旺期抽雄期达到最大值。自 6 月初至 7 月下旬,随着温度的升高玉米植株和根系生长迅速,同时随着温度的升高土壤微生物的活性增强,土壤的有机质增加,使得土壤呼吸作用逐渐增强。抽雄期土壤温度达到峰值,各处理土壤呼吸速率达到最大值,最大值为 7.89 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$;抽雄期—成熟期,气温下降,土壤呼吸速率也有所减弱,成熟期最小值为 1.46 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。抽雄期各处理平均值为 7.08 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$;灌浆期有所下降,各处理平均值为 4.83 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$;成熟期降到最低各处理平均值为 1.82 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。W1、W2、W3 处理下,随着可降解膜诱导期的延长,土壤呼吸速率呈增加的趋势,W2M3 达到最大值,说明土壤呼吸受灌水量和可降解膜的同时影响。抽雄期 W2 处理下,M3 比 M1、M2 分别提高 15.52%、8.83%。

2.2.3　各处理滴灌玉米土壤呼吸速率的影响因素

表 5 是各处理土壤呼吸速率与土壤温度、土壤体积含水率、日均温、降雨量的相关性分析。由表 5 可知,各处理土壤呼吸速率与土壤温度、日均温均显著性相关,达到极显著水平($P<0.01$),土壤呼吸速率与土壤体积含水率、降雨量没有相关关系($P>0.05$)。对土壤温度与土壤呼吸速率进行回归分析(表 6),表明土壤呼吸速率与土壤温度、日均温均呈正相关指数函数关系,与前人研究结果一致[16-18]。进一步计算各处理土壤呼吸温度敏感性 $Q_{10}=e^{10b}$,b 为土壤呼吸速率与土壤温度指数方程 $y=ae^{bt}$ 中的拟合参数。结果表明,Q_{10} 值在 W2M3 取得最大值 2.034,说明 W2M3 土壤温度的敏感性最高,W1M1 取得最小值 1.584,说明 W1M1 土壤温度的敏感性最低。

2.2.4　各处理滴灌玉米土壤呼吸总量、籽粒产量和经济—环境效益值　不同的灌水量和可降解膜处理土壤呼吸总量、籽粒产量和经济-环境效益值如表 7 所示。单因素的地膜、灌水量对土壤呼吸总量差异显著($P<0.05$);灌水量对玉米籽粒产量、灌溉水利用效率差异显著($P<0.05$),地膜对玉米籽粒产量、灌溉水利用效率差异不显著($P>0.05$);灌水量对经济—环境效益值差异不显著($P>0.05$);地膜对经济-环境效益值差异显著($P<0.05$);双因素的地膜和灌水量对土壤呼吸总量、籽粒产量、灌溉水利用效率、经济-环境效益值的影响达到极显著水平($P<0.01$)。

表 3　玉米抽穗期不同处理下土壤呼吸速率日变化特征/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

Table 3　Diurnal variation of soil respiration rate under different treatments at heading stage of maize

处理 Treatment	7 月 20 日 July 20					
	6：00	10：00	14：00	18：00	22：00	2：00
W1M1	1.15±0.16e	6.09±0.08d	9.57±0.13d	7.15±0.17e	5.26±0.11d	2.45±0.08d
W1M2	1.37±0.14c	6.24±0.16c	9.76±0.08c	7.32±0.09d	5.53±0.07c	2.68±0.12c
W1M3	1.58±0.08a	6.58±0.15b	9.98±0.13b	7.69±0.17b	5.78±0.15b	2.87±0.06b
W2M1	1.26±0.02d	6.18±0.23c	9.69±0.21c	7.48±0.06c	5.61±0.23c	2.63±0.14c
W2M2	1.49±0.11b	6.46±0.19b	9.96±0.07b	7.73±0.23b	5.85±0.14b	2.85±0.26b
W2M3	1.67±0.21a	6.89±0.07a	10.12±0.16a	8.05±0.16a	6.12±0.20a	3.24±0.24a
W3M1	1.28±0.07d	6.23±0.13c	9.74±0.09c	7.52±0.05c	5.57±0.08c	2.69±0.17c
W3M2	1.49±0.15b	6.51±0.25b	9.93±0.17b	7.78±0.28b	5.79±0.16b	2.93±0.13b
W3M3	1.57±0.09a	6.73±0.06a	10.06±0.23b	7.92±0.12a	6.08±0.21a	3.18±0.15a
显著性检验(F 值) Significance test (F value)						
W	27.957	201.518	8.172	53.849	81.152	106.893
M	15.693**	46.684**	37.528**	62.978**	74.376**	25.876**
W×M	21.263**	18.538**	57.296**	78.365**	9.753**	124.629**

注:* 表示显著差异($P<0.05$),** 表示极显著差异($P<0.01$);同列数值后不同字母表示处理间显著差异($P<0.05$)。W、M 分别是单因素的灌水量、可降解膜对土壤呼吸速率日变化的影响,$W\times M$ 是二者的交互作用。下同。

Note: * indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$); different letters after the same column value indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). W and M are the effects of single factor irrigation and degradable membrane on the daily variation of soil respiration rate, respectively, W×M is the interaction between them. The same below.

表 4 各处理不同发育期土壤呼吸速率/($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

Table 4 Soil respiration rate at different developmental stages of each treatment

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽雄期 Tasseling stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturing stage
W1M1	0.96±0.01e	3.29±0.05d	6.36±0.05d	4.26±0.03e	1.46±0.05d
W1M2	1.07±0.03e	3.58±0.06c	6.79±0.04c	4.58±0.06d	1.67±0.04c
W1M3	1.25±0.02c	3.97±0.03b	7.15±0.07b	4.96±0.02c	1.95±0.07b
W2M1	1.16±0.02d	3.64±0.02c	6.83±0.02c	4.63±0.02d	1.59±0.02d
W2M2	1.39±0.01b	4.02±0.01b	7.25±0.07b	4.97±0.05c	1.93±0.04b
W2M3	1.68±0.01a	4.51±0.03a	7.89±0.02a	5.46±0.06a	2.39±0.02a
W3M1	1.23±0.01c	3.72±0.07c	6.91±0.02c	4.53±0.01d	1.63±0.02c
W3M2	1.34±0.03b	3.95±0.02b	7.19±0.04b	4.92±0.03c	1.76±0.04c
W3M3	1.41±0.02b	4.09±0.06b	7.31±0.01b	5.15±0.04b	2.04±0.01b
显著性检验(F 值) Significance test (F value)					
W	18.782*	26.619*	20.295*	24.125*	8.481*
M	28.161**	61.146**	100.637**	108.062**	55.374**
W×M	26.466**	46.648**	71.757**	106.921**	35.905**

表 5 各处理土壤呼吸速率与土壤温度、土壤体积含水率、日均温、降雨量的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between soil respiration rate and soil temperature, soil volumetric water content, daily average temperature and rainfall

处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature	土壤体积含水率 Soil volumetric water content	日均温 Daily average temperature	降雨量 Rainfall
W1M1	0.742**	0.158	0.768**	0.218
W1M2	0.785**	0.387	0.659**	0.179
W1M3	0.769**	0.289	0.749**	0.168
W2M1	0.838**	0.429	0.712**	0.231
W2M2	0.819**	0.316	0.637**	0.326
W2M3	0.846**	0.297	0.675**	0.276
W3M1	0.867**	0.318	0.697**	0.352
W3M2	0.832**	0.369	0.759**	0.165
W3M3	0.768**	0.436	0.816**	0.379

表 6 各处理土壤呼吸速率与土壤温度(t)、日均温(T)的拟合方程

Table 6 Fit equations for soil respiration rate and soil temperature (t) and daily mean air temperature (T)

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	Q_{10}	回归方程 Regression equation	R^2
W1M1	$y=0.517e^{0.046t}$	0.6283	1.584	$y=0.147e^{0.063T}$	0.6438
W1M2	$y=0.663e^{0.063t}$	0.5893	1.878	$y=0.328e^{0.036T}$	0.6124
W1M3	$y=0.867e^{0.048t}$	0.7641	1.616	$y=0.518e^{0.016T}$	0.5987
W2M1	$y=0.784e^{0.056t}$	0.6739	1.751	$y=0.346e^{0.032T}$	0.7124
W2M2	$y=0.958e^{0.038t}$	0.7452	1.462	$y=0.423e^{0.025T}$	0.7358
W2M3	$y=1.136e^{0.071t}$	0.6483	2.034	$y=0.618e^{0.011T}$	0.7643
W3M1	$y=0.826e^{0.053t}$	0.6028	1.699	$y=0.417e^{0.028T}$	0.6539
W3M2	$y=0.897e^{0.047t}$	0.5943	1.6	$y=0.489e^{0.021T}$	0.6782
W3M3	$y=0.976e^{0.063t}$	0.7865	1.878	$y=0.523e0^{.017T}$	0.6159

由表 7 可知,在玉米生育期土壤呼吸总量在 17.75~23.44 t · hm^{-2}。同一灌水水平下,土壤呼吸总量表现为 W1M1<W1M2<W1M3,W2M1<W2M2<W2M3,W3M1<W3M2<W3M3,随着地膜诱导期的延长呈增加趋势,W2 处理土壤呼吸总量高于 W1、W3 处理,W2M3 土壤呼吸总量最高,说明灌水量会影响土壤呼吸总量,可能是由于灌水量的高低影响土壤水热环境,进而使得土壤微生物的活性及种群发生变化造成的。同一地膜,W1 灌水水平的土壤呼吸总量与 W2、W3 灌水水平呼吸总量差异显著($P<0.05$)。玉米籽粒产量介于 11.60~12.81t · hm^{-2},W2M3 籽粒产量最高,W2M2 次之。同一灌水水平,籽粒产量差异不显著($P>0.05$);同一地膜,在不同灌水水平籽粒产量差异显著($P<0.05$)。中等灌水水平下,W2M3 籽粒产量分别比 W2M1、W2M2 提高 2.64%、0.31%。对灌溉水利用效率而言,并未在 W2M3 取得最大值,而是在 W1M2 取得最大值。灌溉水利用效率的变化规律与籽粒产量的变化规律相似。

不同灌水量和可降解膜处理的玉米土壤呼吸总量和籽粒产量进行分析、比值,得出每千克籽粒收获时土壤释放出 CO_2的量[19],并比较不同处理玉米田经济-环境效益值(表 7)。表 7 可以看出每生产 1 kg 玉米籽粒,各处理释放出 CO_2的量介于 1.42

~1.83 kg,W2M2 处理经济—环境效益值最优,为 1.42 kg·kg^{-1}。综合各处理土壤呼吸总量、籽粒产量、灌溉水利用效率、经济—环境效益值,得出 W2M2 处理效果最好。

2.3　不同灌水量和可降解膜处理下滴灌玉米的投入与产出

表 8 是不同的灌水量和可降解膜处理滴灌玉米的收入情况,单因素的地膜、灌水量对玉米的投入、收益未达到显著性差异(P>0.05),灌水量对玉米产出的影响达到显著性水平(P<0.05),双因素的地膜和灌水量对玉米的投入、产出、收益的影响达到显著性水平(P<0.05)。

由表 8 可知,W1 灌水水平,W1M1、W1M2 投入比 W1M3 高 200、250 元·hm^{-2},主要是由于可降解膜的成本高于普通塑料地膜,M2 比 M1 成本高是由于制作配方不同,诱导期不同。玉米收益介于 4 207~6 815元·hm^{-2},W2M3 收益最高,W3M1 收益最低。可降解膜处理比普通地膜处理收益平均减少 986.33 元·hm^{-2},但可降解膜不需要后期的人工回收,也不会引起残膜污染、作物减产等问题。可降解膜规模化生产后,其成本可进一步降低,有广阔的应用前景。

表 7　各处理土壤呼吸总量、籽粒产量、灌溉水利用效率、经济—环境效益值

Table 7　Total soil respiration, grain yield, irrigation water use efficiency and economic-environmental benefit values of each treatment

处理 Treatment	土壤呼吸总量/(t·hm^{-2}) Total amount of soil respiration	籽粒产量/(t·hm^{-2}) Grain yield	灌溉水利用效率/(kg·m^{-3}) *i*WUE	经济—环境效益值/(kg·kg^{-1}) Economic-environmental benefit value
W1M1	17.75±0.67e	11.60±0.59d	2.51±0.08a	1.53±0.05d
W1M2	19.72±0.32d	11.81±0.37d	2.55±0.09a	1.67±0.03c
W1M3	21.05±0.54c	11.76±0.32d	2.54±0.14a	1.79±0.03ab
W2M1	20.34±0.64c	12.48±0.47bc	2.22±0.12c	1.63±0.02c
W2M2	18.13±0.57d	12.77±0.32a	2.27±0.13bc	1.42±0.05e
W2M3	23.44±0.56a	12.81±0.65a	2.28±0.09b	1.83±0.03a
W3M1	18.42±0.53d	12.36±0.43c	1.87±0.13d	1.49±0.06d
W3M2	20.89±0.89c	12.51±0.76b	1.89±0.09d	1.67±0.03c
W3M3	21.91±1.54b	12.59±0.53b	1.90±0.11d	1.74±0.02b
显著性检验(F 值) Significance test (F value)				
W	4.67*	11.89*	27.98*	9.75
M	8.97*	17.89	76.85	81.97*
W×M	220.91**	99.22**	218.70**	59.54**

表 8　各处理玉米的投入与产出/(元·hm^{-2})

Table 8　Income and expenditure of each treated corn/(yuan·hm^{-2})

处理 Treatment	产出 Output	投入 Input	收益 Income
W1M1	23200±530e	18510±368d	4690±62e
W1M2	23610±469d	18560±463d	5050±78d
W1M3	23510±572d	17810±487e	5700±89c
W2M1	24960±478b	19510±520b	5450±114c
W2M2	25545±398a	19560±537b	5985±58b
W2M3	25625±458a	18810±608c	6815±150a
W3M1	24717±570c	20510±539a	4207±89f
W3M2	25010±528b	20560±620a	4450±65f
W3M3	25170±427b	19810±671b	5360±93c
显著性检验(F 值) Significance test (F value)			
W	89.54*	165.42	76.36
M	35.78	4.89	125.65
W×M	8.07**	15.73**	231.84**

3　讨　论

土壤呼吸是指植株的根呼吸、土壤微生物分解有机质、动物呼吸,从土壤中释放出 CO_2的过程[20]。本研究发现不同灌水量和可降解膜对滴灌玉米土壤呼吸速率日变化均呈单峰型曲线,这与李强等[21]的研究结果相一致,峰值出在 14∶00,与高金芳等[22]研究出现的峰值时间不一致,这可能是由于气候、土壤类型、测定时间的差异引起的,但与崔海等[23]研究峰值出现在 12∶00~14∶00 相近。9 个不同处理玉米土壤呼吸呈“先升高后降低”变化趋势,表现出的明显季节特点,最高值出现在抽雄期,最低值出现在苗期,这与前人[14,24]研究结果类似。这是由于玉米苗期,气温、土壤湿度低,加之此时植株较小,根呼吸少,土壤微生物活动能力弱引起的;随着玉米植株生长、气温升高等因素,土壤呼吸逐渐升高。

土壤呼吸的季节变化主要是由土壤温度、湿度、气象因素、光合产物及其共同作用引起的。本研究表明土壤温度、气温是影响土壤呼吸的重要因子,土壤体积含水率与降水量与土壤呼吸无显著性(P>0.05),不是影响土壤呼吸的重要因子。土壤呼吸日变化的驱动因子主要是土壤温度,刘爽等[25]研究发现,适度增温可以提高土壤微生物的活性,直接影响根呼吸,但当温度较高时,它不再是限制土壤呼吸的因子。本研究发现气温与 5 cm 土壤温度均与土壤呼吸速率的变化规律相似,均与土壤呼吸速率是正相关指数关系。Q_{10}通常被学者用来衡量

土壤呼吸的敏感性,其值越大表明土壤呼吸对土壤温度的敏感性越强,Zheng 等[26]研究发现 Q_{10} 一般为 1.28~4.75,本研究不同处理 Q_{10} 的变化范围是 1.584~2.034,属于正常范围。土壤呼吸与土壤水分有正相关、负相关、不相关 3 种关系[27-29]。本研究发现,土壤体积含水率与土壤呼吸速率无显著相关性。降水是农田生态系统的重要影响因子,它是通过土壤温度、土壤含水量、土壤特性等的改变影响土壤呼吸[30],本研究发现降水量与土壤呼吸相关关系不强,可能是其对土壤呼吸的影响被其他因子掩盖了。

本研究中不同灌水量和可降解膜的滴灌玉米处理全生育期土壤呼吸总量在 17.75~23.44 t·hm^{-2}之间,籽粒产量在 11.60~12.81 t·hm^{-2},说明灌水量和可降解膜的差异会影响土壤呼吸总量和产量。研究发现[31]土壤湿度过高和过低都会影响土壤呼吸,本研究发现土壤呼吸总量随灌水量的增加呈先升高后降低的趋势,最大值在 W2M3 处理取得。翟超等[6]研究发现,玉米产量随灌水量的增加呈先升高后降低变化,邬强等[32]研究发现,可降解膜覆盖相对于普通塑料地膜覆盖会造成棉花产量下降,本研究发现 W2 各处理玉米产量相对高于 W1、W3 各处理的产量,同一灌水水平下,普通地膜覆盖的玉米产量高于可降解膜覆盖,产量最大值在 W2M3 取得。不同灌水量和可降解处理下的滴灌玉米田蓄水、保墒效果会有所差异,带来的经济—环境效益值也有所不同。本研究得出玉米经济—经济环境效益值为 1.53~1.83 kg·kg^{-1} CO_2,这与孟磊等[19]研究结果相似,与涂纯[33]研究结果不同。这可能是由于作物、气候状况、研究方法等不同出现的差异。W2M2 经济—环境效益值最优,具有较好的综合效益。本研究 iWUE 在 1.87~2.55 kg·m^{-3},随着灌水量的增加总体呈降低趋势。

可降解地膜的成本较普通地膜高,是制约可降解膜大面积推广的因素。本研究可降解膜覆盖较普通地膜覆盖收益平均减少 1 479.5 元·hm^{-2}。降解膜材料虽较普通地膜高,但是可降解膜降解性能较好,在已有设备条件下,就可生产,而且大面积生产后,其成本会进一步降低。从生态可持续角度考虑,可降解膜的应用可以有效地解决新疆严重的残膜污染问题。

4 结 论

1)研究发现土壤呼吸日变化呈单峰型曲线,最高值出现在 14:00,季节变化随玉米生育期的推进呈先升后降的变化趋势,玉米抽雄期最高。各处理土壤呼吸速率与气温、地温呈显著的正相关指数关系,与土壤含水率相关性不大。W2M3 土壤温度的敏感性指数最高,W1M1 土壤温度敏感型指数最低。

2)W2M3 土壤呼吸总量、产量、收益最高,但经济—环境效益值最差,W1M2 的 iWUE 最高,W2M2 产量仅次于 W2M3,土壤呼吸总量较低,经济—环境效益值最好,综合各指标 W2M2 处理效果最佳。

3)本试验对不同灌水量和可降解膜对滴灌玉米土壤呼吸及其影响因子、产量、经济—环境效益值、经济效益进行全面的分析,为新疆可降解膜的大面积应用、高效用水、低碳农业的发展提供依据。

参 考 文 献:

[1] Yu Q, Yi S, Li N, et al. Advance in studies of carbon cycling on alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta pratacultorae sinica, 2012, (6): 275-285.

[2] 陈书涛,胡正华,张勇,等. 陆地生态系统土壤呼吸时空变异的影响因素研究进展[J]. 环境科学,2011,32(8):2184-2192.

[3] 吴海霞. 能源市场与玉米市场价格波动及其效应研究 [D]. 咸阳:西北农林科技大学,2014.

[4] 刘建亮. 旱地高产高效玉米栽培体系水氮管理及调控[D].咸阳:西北农林科技大学,2014.

[5] 王振华,杨培岭,郑旭荣,等. 膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J].农业工程学报,2014,30(4):90-99.

[6] 翟超,周和平,赵健. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J].中国农业科学,2017,50(14):2769-2780.

[7] 马富裕,周治国,郑重,等. 新疆棉花膜下滴灌技术的发展与完善[J].干旱地区农业研究,2004,22(3):202-208.

[8] 严昌荣,王序俭,何文清,等. 新疆石河子地区棉田土壤中地膜残留研究[J].生态学报,2008,28(7):3470-3474.

[9] 刘建国,李彦斌,张伟,等. 绿洲棉田长期连作下残膜分布及对棉花生长的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(2):246-250.

[10] 涂纯,王俊,官情,等.秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济环境效益的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(8):931-937.

[11] 刘虎成,徐坤,张永征,等.滴灌施肥技术对生姜产量及水肥利用率的影响[J].农业工程学报,2012,28(增刊 1):106-111.

[12] 胡发龙,柴强,甘延太,等.少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J].中国农业科学,2016,49(1):120-131.

[13] 李虎,邱建军,王立刚,等.中国农田主要温室气体排放特征与控制技术[J].生态环境学报,2012,21(1):159-165.

[14] 崔凤娟.免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤呼吸和碳平衡的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[15] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO_2 efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. Global change biology, 2001, 7:667-677.

(下转第 21 页)