

不同覆膜材料汇集微量降水及露水对土壤水分的影响

管恩晴¹, 马波^{1,2}, 郭嘉¹, 王彦军¹, 杨艳¹

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 探明覆膜材料汇集微量降水及露水对土壤水分的影响, 为宁夏回族自治区中部干旱带微量降水及露水有效利用提供科学依据及支撑。[方法] 设置了普通聚乙烯膜覆垄(T_1)、高密度聚乙烯膜覆垄(T_2)、聚四氟乙烯膜覆垄(T_3)共3个处理, 以裸地(T_4)为对照, 进行集流面坡度优化, 对微量降水和露水发生过程中土壤水分变化特征进行研究。[结果] ①研究区多年单次5 mm以下降水总量占年降水量的29.8%, 年平均露水量为31.68 mm, 占多年平均降水量的13.2%; ②不同覆垄模式5 cm和15 cm埋深位置土壤体积含水率大小顺序一致, 表现为: 聚四氟乙烯膜覆垄>普通聚乙烯膜覆垄>高密度聚乙烯膜覆垄>裸地; ③覆垄汇集微量降水对土壤水分影响深度明显增加, 降水量为2 mm时, 对土壤水分的影响深度可达15 cm, 而裸地条件下仅达到5 cm位置; ④露地对土壤水分的影响在0—5 cm, 当露水量为0.8 mm时, 普通聚乙烯膜覆垄、高密度聚乙烯膜覆垄、聚四氟乙烯膜覆垄、裸地的土壤体积含水率分别提高0.6%, 1.6%, 4%, 0.2%。[结论] 不同覆膜处理汇集微量降水和露水对土壤水分影响存在显著差异, 其中聚四氟乙烯膜覆垄汇集效果最好, 垄沟内土壤体积含水率最大。

关键词: 覆膜材料; 微量降水; 露水; 土壤水分; 宁夏回族自治区中部干旱地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0187-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 管恩晴, 马波, 郭嘉, 等. 不同覆膜材料汇集微量降水及露水对土壤水分的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 187-195. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.020; Guan Enqing, Ma Bo, Guo Jia, et al. Effects of different mulching materials on soil moisture by faint rainfall and dew collection [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 187-195.

Effects of Different Mulching Materials on Soil Moisture by Faint Rainfall and Dew Collection

Guan Enqing¹, Ma Bo^{1,2}, Guo Jia¹, Wang Yanjun¹, Yang Yan¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan,

Ningxia 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern

Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: [Objective] The effects of mulching materials on the collection of faint rainfall and dew from soil moisture were analysed to provide a scientific basis to support their efficient utilisation in central arid belt of Ningxia Hui Autonomous Region. [Methods] Three treatments were evaluated in the field experiment: ordinary polyethylene film mulch (T_1), high-density polyethylene film mulch (T_2) and polytetrafluoroethylene film mulch (T_3); bare ground (T_4) was used as the control. The slopes of the catchment surface were optimised, and the changes in soil moisture during faint rainfall and dew events were determined. [Results] ① The total multi-year single precipitation of less than 5 mm accounted for 29.8% of the annual precipitation in the study area, with an average annual dew of 31.68 mm, representing 13.2% of the average multi-year precipitation. ② The order of soil volumetric moisture content at depths of 5 and 15 cm in different ridge mulching modes was consistent, decreasing from polytetrafluoroethylene film mulching > ordinary polyethylene film mulching > high density polyethylene film mulching > bare ground. ③ The depth of influence of ridge

收稿日期: 2024-01-06

修回日期: 2024-04-25

资助项目: 宁夏自然科学基金项目“黑果枸杞 OPC 生物合成关键酶活性对水分胁迫和光质的响应”(2022AAC02018); 宁夏重点研发计划项目(2019BEH03010; 2023BEG02054); 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)项目(NXYLXK2021A03)

第一作者: 管恩晴(1999—), 女(汉族), 山东省日照市人, 硕士研究生, 研究方向为农业生态水文。Email: geq17866702683@163.com。

通信作者: 马波(1981—), 男(回族), 宁夏回族自治区彭阳县人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。Email: slxboma-34@163.com。

mulching on soil moisture increased significantly when collecting faint rainfall, and was up to 15 cm for 2 mm precipitation, whereas it was only up to 5 cm in the bare ground control. ④ The effect of dew on soil moisture was mainly above 5 cm, and when the dew amount was 0.8 mm, the soil moisture of ordinary polyethylene film mulch, high-density polyethylene film mulch, polytetrafluoroethylene film mulch and bare soil increased by 0.6%, 1.6%, 4.0% and 0.2%, respectively. [Conclusion] We found significant differences in the effects of three mulching treatments to pool faint rainfall and dew to increase soil moisture, of which the polytetrafluoroethylene film mulch ridges pooled the best, with soil moisture content in the ridges being greatest.

Keywords: graft material; faint rainfall; dew; soil moisture; central arid belt of Ningxia Hui Autonomous Region

中国西北部干旱带降水稀少,蒸发量大,水资源短缺极为严重,因此,开发利用一切潜在水资源是缓解该地区水资源紧缺的重要途径。近年来,提高微量降水利用效率是干旱地区降水利用的一个重要方向,此外,与降水资源相比,露水量虽然少,但在干旱地区是地表植物和微生物重要水源,可为生物提供游离态水,对植物供水量可高达 63%,能被小动物直接利用^[1-2],在维持沙漠生物土壤结皮、促进种子萌发方面具有显著效果^[3-4],对维持干旱半干旱地区生态系统稳定有着不可忽视的作用^[5-6],所以对微量降水和露水获取模式的理论和工艺进行研究具有重要意义。

沟垄集雨系统是干旱地区降水利用的一种重要模式^[7-9],其原理在于利用微地形、结合新材料和新工艺等方法,增强坡面径流、减少降水入渗,最大限度利用降水解决水资源紧缺问题。垄沟覆盖既可降低雨水坡面入渗,又能增加沟内雨水汇集,提高了降水利用效率^[10-12],同时,覆盖能够有效抑制土壤水分蒸发,影响水热状况^[13-14],进而促进作物生长,提高作物产量^[15-17]。目前,优化沟垄集雨系统微地形、采用高效集水材料覆盖仍然是沟垄集雨系统的重要研究方向,研究^[18]发现,通过修筑不同坡形的沟垄来改变田间地形,等高垄处理可使土壤水分提高 0.42%,作物存活率增加了 50%。而与无覆盖沟垄相比,在沟垄覆盖地膜可提高降水汇集量,水分利用效率比裸地高 53.2%^[19],并且发现沟垄全膜覆盖对降水的利用效率高于单膜覆盖,土壤含水率比单膜覆盖处理高 17.3%^[20],植物株高可提高 5.63%^[21]。而有些学者^[11]采取地膜加盖防草地布处理,发现既可汇集降水又可汇集露水,15 cm 位置日平均土壤水分比不覆膜处理高 11.2%。此外,当沟垄覆盖材料相同,沟垄比不同时,土壤水分变化存在差异,沟垄比为 60 cm : 60 cm 的水分利用效率比平作处理高 42.37%,作物产量高 26.37%^[22]。以往研究^[23-25]主要集中在不同的沟垄结构、覆盖模式、覆盖材料汇集降水对土壤水分的影响方面,研究中主要选用地膜或地布覆垄处理,而关于不同斥水性覆膜材料汇集微量降水、露水对土壤水分影响的方面较少。鉴于此,本研究在宁夏回族自治区中部

典型干旱地区采用 3 种覆膜材料覆垄处理,分析微量降水和露水发生过程中不同处理条件下土壤水分变化特征,筛选最优微量降水和露水汇集材料,以期为干旱地区微量降水和露水利用提供理论依据和支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头区香山镇红圈子村尹东自然队“宁夏中部干旱带水资源多元化调度研究示范基地”(37°34'N,105°10'E)。研究区西南与甘肃省白银市靖远县接壤,属于黄土丘陵沟壑区。该地区海拔高度为 1 740 m,年无霜期 155 d,年平均气温 6.8 °C,气候干旱,年平均降水量为 240.7 mm,年平均水面蒸发量高达 1 600 mm,干旱指数为 6.65,全年日均照为 2 700 h,热量丰富。试验区域土壤类型以棕钙土和灰钙土为主,有机质层薄。

1.2 试验设计

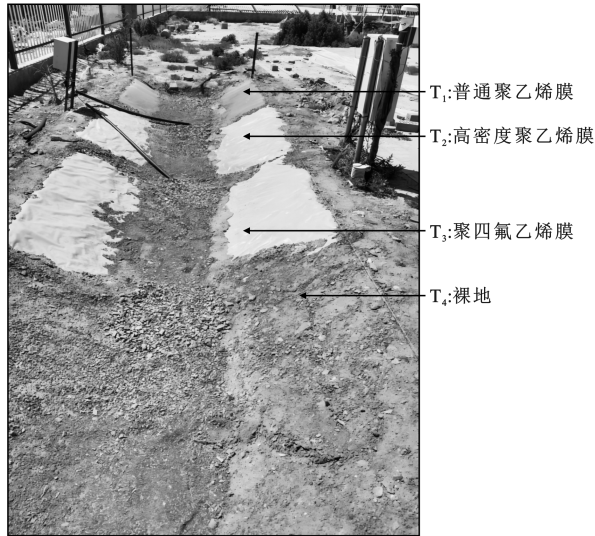
研究设置普通聚乙烯膜覆垄(T_1)、高密度聚乙烯膜覆垄(T_2)和聚四氟乙烯膜覆垄(T_3)3 种模式(图 1),以裸地为对照(T_4),3 种覆盖材料摩擦系数依次为 0.2^[26],0.18^[26]和 0.04^[27-28]。依据各材料摩擦系数计算可得:集流面边坡 $\theta > 21.8^\circ$ 时能够满足汇集条件,考虑施工条件和可操作性,选边坡坡度为 30° ,计算垄宽为 70 cm,沟宽为 60 cm,垄高为 40 cm。对 4 组处理下的土壤水分进行为期 1 a 的实时监测,研究不同覆膜材料覆盖下土壤水分的变化特点。每个处理长度设置为 2 m,在处理中间 5,15,30 cm 位置埋设土壤水分、温度、电导率传感器 GS3(其中土壤体积含水率精度为 $\pm 0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,土壤温度精度为 $\pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$,电导率精度为 $\pm 5\%$)。传感器数据由数据采集器(EM50)自动采集,时间间隔为 30 min。

1.3 参考露水量

3 种不同覆膜材料下均为质地相同的土壤作为垫层,而且覆膜材料厚度较小,因此认为覆膜材料表面温度无显著差异、露水量相近。本研究采用叶片湿度传感器所获取的露水量作为不同处理条件的参考露水量^[6],计算方法为:

$$W_d = 0.003 2e^{0.005 4x}$$

式中: W_d 为叶片湿度传感器表面水层厚度(mm); x 为叶片湿度传感器测量的原始电压值(单位为 mV,最低临界值为 447 mV)。计算时要考虑到降水对露水形成的影响,降水发生过程认为没有露水产生,不进行计算。



注:图中 T_1, T_2, T_3, T_4 为不同试验处理,分别为普通聚乙烯膜覆盖,高密度聚乙烯膜覆盖,聚四氟乙烯膜覆盖,裸地(对照)。下同。

图1 田间试验布设示意图

Fig.1 Diagram of field test layout

当水膜形成水滴时,满足受力要求后开始滑落,由于覆盖材料摩擦系数不同,产生水滴的水量有所不同,因此各处理最终汇集的水量有所差异,即露水产生量相同汇集量不同,垄沟内汇集的露水量为两侧垄坡与沟内露水量总和。

1.4 数据处理及统计及分析

利用 Microsoft Excel 2022 对月降水量、月露水

量、土壤体积含水率进行统计计算及分析,采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 降水及露水时间分布

该地区降水及露水年际间和年内分布不均,详见表1,对2018—2022年降水分布分析发现多年平均降水量为240.7 mm,多年单次5 mm以下降水量占降水总量的29.8%。在当地作物关键生育期(4—7月)内,年均降水总量占多年平均降水量的47.2%,4—7月单次5 mm以下降水总量占多年平均降水量的33.2%。说明5 mm以下降水总量与年降水量或作物关键生育期降水总量相比,比例均较高,极具开发利用潜力。试验区昼夜温差大,露水易凝结,2018—2022年月露水分布详见表2,多年平均露水量可达31.68 mm,占多年平均降水量的13.2%,4—7月露水总量占多年平均降水量的37.5%,占作物关键生育期降水量的10.5%。一年中有10个月发生露水,达12个月的83.3%,可见露水量虽不及降水量多,但发生频率高,稳定性强^[4, 6]。此外,根据5 a降水及露水的分布可知,研究区春季(3—5月)干旱少雨,露水量较多,夏季(6—8月)降水量及露水量最多,呈现一年中最大趋势,秋季(9—11月)降水量及露水量仅次于夏季,冬季(12—2月)降水量及露水量全年最低。单次5 mm以下降水发生次数较多,露水量虽少但发生频率较高,因此,在宁夏回族自治区干旱半干旱地区微量降水及露水对该地区的农业发展有着不可忽视的作用,是该地区农业用水的重要来源。

表1 研究区2018—2022年降水分布

Table 1 Distribution of precipitation in study area from 2018 to 2022

月份	月降水量/mm					次降水5 mm以下月总降水量/mm					5 mm以下次降水占总降水比例/%				
	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
1	2.4	2.2	6.8	1.5	0.4	2.4	2.2	6.8	1.5	0.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	3.9	2.9	0.0	6.4	0.2	3.9	2.9	0.0	6.4	0.2	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0
3	0.6	2.1	0.6	13.7	0.4	0.6	2.1	0.6	2.7	0.4	100.0	100.0	100.0	19.7	100.0
4	22.3	16.4	4.2	38.0	3.6	5.7	5.5	4.2	5.3	3.6	25.6	33.5	100.0	13.9	100.0
5	32.4	22.4	4.7	18.1	7.6	7.9	6.1	4.7	2.4	7.6	24.4	27.2	100.0	13.3	100.0
6	18.5	100.2	25.2	29.4	18.8	5.7	5.3	7.0	13.0	9.8	30.8	5.3	27.8	45.6	52.1
7	65.5	44.8	39.2	4.0	53.0	16.8	11.2	18.0	4.0	44.6	25.6	25.0	45.7	100.0	84.2
8	140.5	38.4	116.0	27.9	21.4	18.1	8.0	0.2	6.3	21.4	12.9	20.8	0.2	22.6	100.0
9	32.2	38.6	17.9	44.4	1.6	12.3	1.8	18.0	4.1	1.6	38.2	4.7	100.0	9.2	100.0
10	6.6	38.0	2.0	32.3	5.6	6.6	3.7	2.0	9.3	5.6	100.0	9.7	100.0	28.8	100.0
11	12.3	4.3	1.0	6.2	0.0	6.9	4.3	1.0	1.1	0.0	56.1	100.0	100.0	17.7	0.0
12	0.1	0.0	3.6	0.1	0.0	0.1	0.0	3.6	0.1	0.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0
合计	337.3	310.3	221.2	222.0	112.6	87.0	53.1	66.0	57.0	95.2	25.8	17.1	29.8	25.5	85.3
4—7月	138.7	183.8	73.3	89.5	83.0	36.1	28.1	33.8	25.1	65.6	26.0	15.3	46.1	28.0	79.0
其他月份	198.6	126.5	147.9	132.5	29.6	50.9	25.0	32.1	31.5	29.6	25.6	19.8	21.7	23.8	100.0
4—7月比例/%	41.1	59.2	33.1	40.3	73.5	41.5	52.9	51.3	44.3	68.9					
其他月份比例/%	58.9	40.8	66.9	59.7	26.5	58.5	47.1	48.7	55.7	31.1					

表2 研究区2018—2022年露水分布

Table 2 Distribution of dew in study area from 2018 to 2022

月份	露水量/mm				
	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年
1	0.02	0.00	3.83	0.00	0.00
2	0.00	0.94	0.02	0.00	0.10
3	0.39	0.49	0.00	0.00	0.91
4	1.01	0.27	1.84	3.79	1.20
5	2.31	3.47	2.12	1.30	0.76
6	1.07	6.47	5.75	1.91	0.99
7	1.82	11.97	7.31	1.64	2.45
8	7.08	4.99	5.34	6.36	4.22
9	4.05	10.07	6.59	11.85	1.22
10	1.89	13.40	1.23	4.07	0.33
11	2.20	4.28	0.10	1.77	0.04
12	0.00	0.06	1.09	0.00	0.00
月平均	1.82	4.70	2.94	3.63	1.02
年总量	21.84	56.41	35.22	32.69	12.22
4—7月	6.21	22.18	17.02	8.64	5.40
其他月份	15.63	34.23	18.20	24.05	6.82
4—7月比例/%	28.40	39.30	48.30	26.40	44.20
其他月份比例/%	71.60	60.70	51.70	73.60	55.80

2.2 土壤水分动态

对埋深5,15 cm位置的土壤水分动态进行分析(图2),4种处理条件下土壤体积含水率大小关系为: $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$,可见,聚四氟乙烯膜覆盖处理具有

比其他3种处理更好的集水效果。土壤水分动态分为4个阶段,由于冻结,该土壤埋深位置土壤水分处于稳定期(12月至翌年2月),土壤体积含水率变化较为稳定。冻结消融后,土壤水分发生了相变(3—5月),土壤体积含水率开始增大,出现较为强烈的波动变化,此段时间内降水频率及降水量明显高于冬季,说明降水入渗提高了土壤体积含水率。土壤水分消耗期(6—8月),该时期处于全年气温最高时期,土壤水分蒸发强度大,土壤体积含水率有所减小,但由于2022年8月份降水量偏高,因此在8月底有一个土壤体积含水率的峰值期,这表明土壤体积含水率峰值期与降雨量峰值期基本吻合。土壤水分增长期(9—11月),气温下降,降水较多,土壤水分蒸发量小于降水入渗,因此土壤体积含水率有所增加。15 cm土层深度土壤体积含水率年变化特征与5 cm土层深度土壤体积含水率年变化特征一致,但5 cm土层深度的土壤体积含水率受降水影响更为显著,说明15 cm土层深度土壤水分对降水的响应存在一定的滞后性。整体来看,覆膜处理的土壤体积含水率高于无覆盖处理,并且不同处理条件下汇集微量降水及露水的效果存在显著差异,与 T_4 相比,一次降水过程 T_2 和 T_3 的土壤体积含水率增幅较大,可见,高密度聚乙烯膜覆盖和聚四氟乙烯膜覆盖处理汇集微量降水及露水的效果比无覆盖处理好。

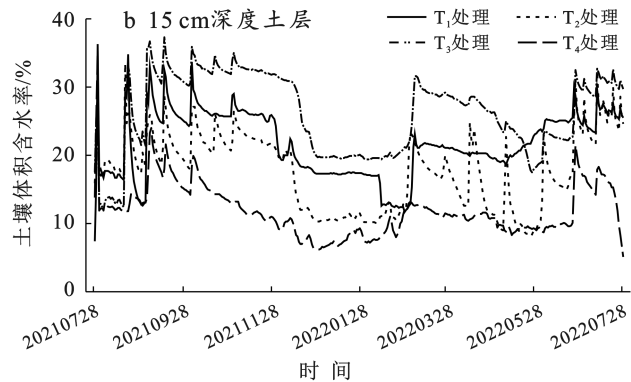
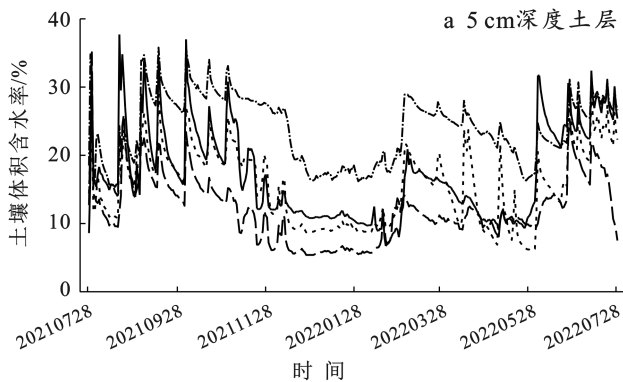


图2 研究区5,15 cm深度土层土壤水分变化

Fig.2 Soil moisture changes in 5 cm and 15 cm soil depths of study area

2.3 微量降水对土壤水分的影响

不同处理对土壤体积含水率的影响有所不同,当发生微量降水时,土壤体积含水率会有所增加。选取5,4,3,2和1 mm降水过程,分析不同处理条件下土壤体积含水率变化,变化过程如图3所示。当降水为5 mm时,5 cm土层深度的土壤体积含水率受降水的影响最大,土壤体积含水率大小关系为: $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$,4组处理的土壤体积含水率均呈现增加趋势,其中, T_4 的土壤体积含水率增加率最小,为0.2%。

相较于5 cm土层深度的土壤体积含水率,15 cm土层深度受降水影响小,但由于 T_1 初始含水率高所以4组处理的土壤体积含水率大小关系为: $T_1 > T_3 > T_2 > T_4$,其中 T_2 的土壤体积含水率在降雨后变化幅度最大,增加率为2.3%。当降水为4 mm时,5 cm土层深度的土壤体积含水率大小关系为: $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$,其中, T_3 的土壤体积含水率增幅最大为6.3%。15 cm土层深度的土壤体积含水率大小关系没变,变化幅度减小, T_2 的土壤体积含水率在降水后变化幅度最大。

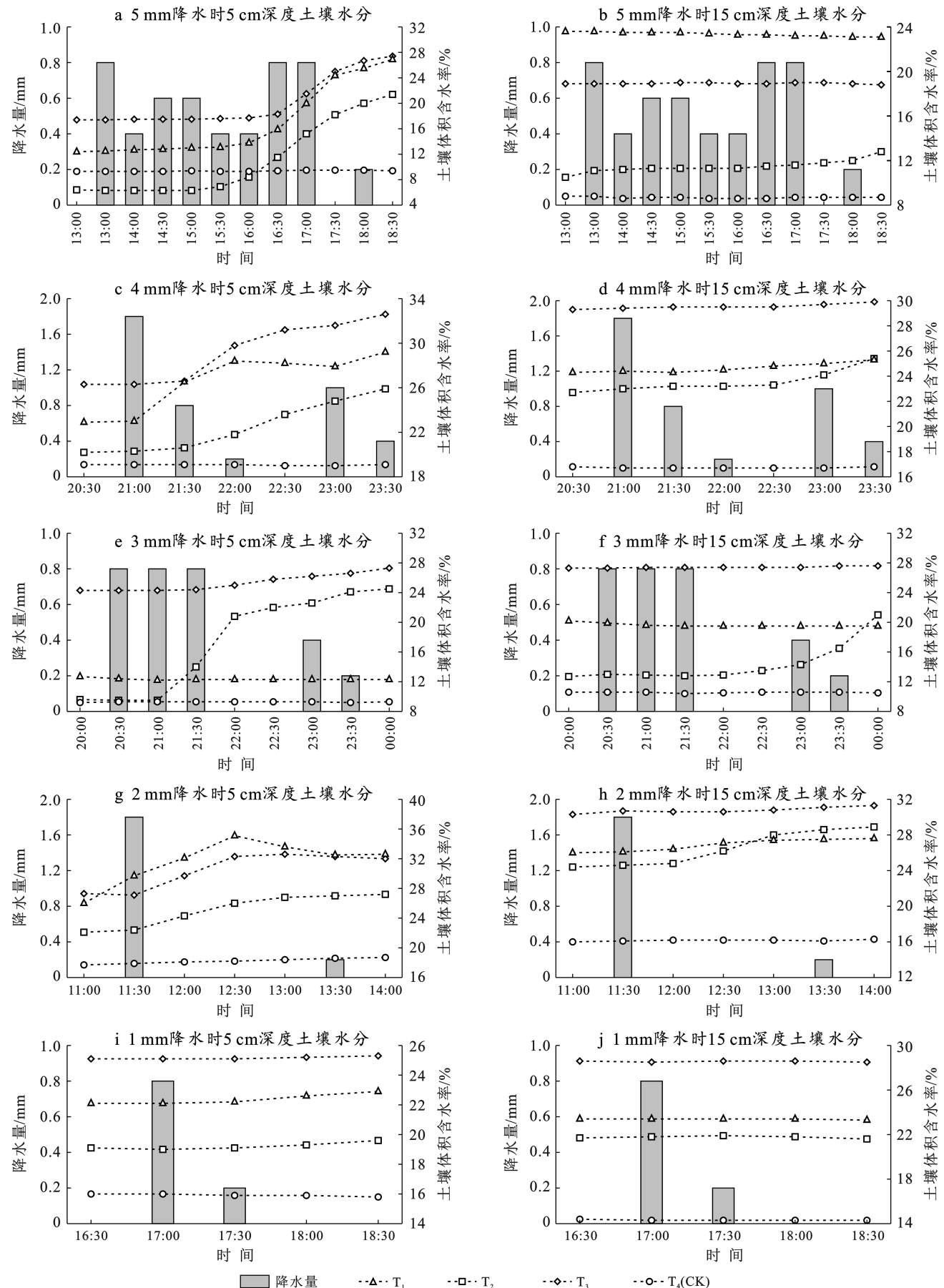


图 3 不同降水条件 5,15 cm 深度土壤水分变化

Fig.3 Changes in soil moisture at 5 and 15 cm depth for different precipitations

当降水为 3 mm 时,5 cm 土层深度处土壤体积含水率的大小关系为: $T_3 > T_2 > T_1 > T_4$,15 cm 土层深度的土壤体积含水率大小关系为: $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$,变化幅度相较于 5 cm 减小, T_2 的土壤体积含水率在降雨后变化幅度最大。当降水为 2 mm 时,5 cm 土层深度, T_1 的初始土壤体积含水率为 29.7%, T_3 的初始土壤体积含水率为 27.1%,可知 $T_1 > T_3$,此时 4 组处理的土壤体积含水率大小关系为: $T_1 > T_3 > T_2 > T_4$ 。15 cm 土层深度的土壤体积含水率大小关系为: $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$ 。同样, T_2 的土壤体积含水率在降雨后变化幅度最大。当降水为 1 mm 时,5 cm 土层深度的土壤体积含水率大小关系为: $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$,其中, T_4 的土壤体积含水率有所降低,说明此时 T_4 降水入渗小于土壤水分蒸发。15 cm 土层深度的土壤体积含水率大小关系不变,土壤水分受降水影响微弱。经比较发现,降水量为 1 mm 时,各处理土壤体积含水率变化较小,而降水量 > 4 mm 时,不同处理条件下的土壤体积含水率变化明显,土壤水分对降水响应最为显著,可见,4 mm 以上的降水量能够使得土壤水分得到有效补充。

2.4 露水对土壤水分的影响

露水量虽不及降水量多,但是发生较为频繁,稳定性高,可以有效补给土壤水分。马波等^[6] 研究认为,当露水量达到 0.6 mm 及以上时 5 cm 位置土壤体积含水率会明显增加。当露水量为 0.6,0.7 mm 时,汇集量较小,故这里分析露水量为 0.8 mm 时,不同处理汇集露水对土壤体积含水率的影响,各处理土壤体积含水率增加率如图 4 所示。

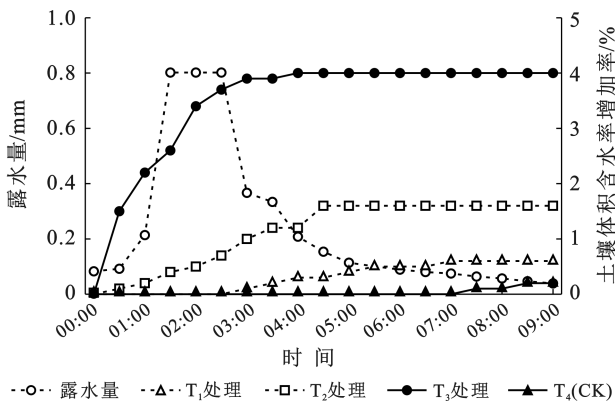


图 4 0.8 mm 露水量时,5 cm 土层深度土壤体积含水率变化
Fig.4 Changes in volumetric soil moisture content at 5 cm soil depth for 0.8 mm dew

露水量为 0.8 mm 时,5 cm 位置,4 种处理的土壤体积含水率增加率大小关系为: $T_3 > T_2 > T_1 > T_4$,其中, T_4 的土壤体积含水率增加率最小为 0.2%, T_1 ,

T_2 , T_3 的土壤体积含水率增加率比 T_4 分别高出 0.4%,1.4%和 3.8%,由此可知覆膜处理可以提高露水汇集量。 T_3 的土壤体积含水率增加率最大为 4.0%,可知聚四氟乙烯膜覆垄处理下的土壤水分对露水的响应最敏感,虽然其他处理的土壤体积含水率增加率较小,但依然表现出增加趋势。此外,露水对 15 cm 位置的土壤体积含水率无影响,由此可知,露水对土壤水分的影响深度在 0—5 cm。

3 讨论

3.1 边坡覆膜材料对微量降水汇集的影响

采取覆盖措施提高降水利用效率是解决农业水资源紧缺的有效方式,张金珠等^[29] 研究表明,覆盖处理的累积蒸发量显著小于裸地无覆盖处理。本研究采用边坡覆膜处理可以将边坡的降水汇集到垄沟内,减少坡面降水截留,促进降水入渗,从而减少土壤水分的蒸发。此外,不同的覆膜材料由于摩擦系数不同导致其斥水性不同,因此对微量降水汇集效果有所不同,当降水为 1—5 mm 时,5 和 15 cm 土层深度, T_3 的土壤体积含水率整体最大,而 T_2 的土壤体积含水率在降雨后的增加率始终最大,说明聚四氟乙烯膜和高密度聚乙烯膜的斥水性强,覆垄处理汇集降水的效果最好,土壤水分蒸发量小,对于土壤表层及中层水分增加十分有利。孙亚荣等^[30] 在黄土丘陵区研究发现当降雨量 > 4 mm 时,表层土壤水分能够得到充分补充,而通过斥水性强的塑料膜覆垄处理可将降雨量 < 4 mm 的微量降水最大程度汇集到垄沟内,提高微量降水利用效率,进而增加土壤水分。

3.2 边坡覆膜材料对露水汇集的影响

与降水相比,露水量较小,而采取地表塑膜覆盖可获取更多露水,但普通地膜汇集露水的效果不明显,因此要选取集水效果好的塑料膜覆垄以提高露水汇集量,抑制土壤无效蒸发,显著提高土壤水分。本研究中垄沟内最终汇集的露水量为两侧垄坡露水量叠加沟内露水总量,不同覆垄处理集水效果差异较大,相比于无覆盖处理,3 种覆膜处理的土壤体积含水率明显较高,抑制土壤水分蒸发效果好^[31]。同时,露水发生后各处理的土壤体积含水率有不同程度的增加, T_2 和 T_3 的土壤体积含水率增加率较大,分别为 1.6%和 4.0%。其中聚四氟乙烯膜覆垄处理汇集露水效果最好,这是由于其摩擦系数小,容易使液化在凝结面的水膜聚集为水滴,发生滑落,可以汇集更多露水至垄沟内,同时可以减少坡面土壤水分的蒸发,这为干旱地区提高露水利用效率方法提供了参考选项。

3.3 边坡覆膜材料对雨露叠加补水效果的影响

传统的地膜覆垄技术建立的集水、保墒系统,能够使得微量降水形成径流到垄沟内,减少两侧垄坡降水入渗,抑制无效蒸发^[32],还可改善土壤水分状况^[33],王琦等^[34]研究结果表明垄沟集雨效率较高,并且土垄集雨的效率低于膜垄。本研究中,普通聚乙烯膜、高密度聚乙烯膜和聚四氟乙烯膜摩擦系数依次减小,斥水性依次增强,所以高密度聚乙烯膜和聚四氟乙烯膜覆垄处理在一次降水或者露水发生后的土壤体积含水率增加率大于普通聚乙烯膜,可见采用摩擦系数小的覆膜材料汇集微量降水或露水的效果好,起到了雨露叠加补水的作用,提高了微量降水及露水的利用效率。同时,研究表明,降水量较小或露水发生时,30 cm 土层深度的土壤体积含水率无变化,而5 cm 和 15 cm 土层深度的土壤体积含水率有显著提高,可见覆膜处理汇集的微量水对深层土壤水分没有影响,但可以有效补充浅层土壤水分。并且,在非生育期发生降水和露水时,采用地膜覆垄能够有效抑制蒸发,当微量降水及露水汇集到垄沟内后,当地的覆砂措施又可将入渗到土壤的水分保存到来作物生育阶段利用,这对当地农业发展具有重要意义。

4 结论

(1) 3种覆垄材料和对照相比均表现出了良好的微量降水和露水汇集效果,降水量不高于5 mm、参考露水量达到0.8 mm时,覆膜处理对提高垄沟内土壤体积含水率具有显著的影响。

(2) 3种覆垄材料比较,聚四氟乙烯膜汇集微量降水和露水后垄沟内土壤体积含水率最大,普通聚乙烯膜覆垄次之,高密度聚乙烯膜覆垄最小,如果考虑降低成本,可选用普通聚乙烯膜覆垄。

(3) 当露水量达到0.8 mm时,聚四氟乙烯膜覆垄处理垄沟内土壤水分最大,与裸土对照相比,土壤体积含水率可提高4%。

综上所述,在干旱少雨地区,采用摩擦系数小的覆垄材料汇集微量降水和露水,不仅可以增加土壤水分,还可以抑制蒸发,这为解决干旱地区水资源紧缺问题提供一定的思路和方法。

参考文献 (References)

[1] Zhuang Yanli, Zhao Wenzhi, Luo Lihui, et al. Dew formation characteristics in the gravel desert ecosystem and its ecological roles on *Reaumuria soongorica* [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126932.

[2] Florentin A, Agam N. Estimating non-rainfall-water-inputs-derived latent heat flux with turbulence-based

methods [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 247: 533-540.

- [3] Li Shenglong, Bowker M A, Xiao Bo. Biocrusts enhance non-rainfall water deposition and alter its distribution in dryland soils [J]. Journal of Hydrology, 2021, 595: 126050.
- [4] 冯天骄,张智起,张立旭,等.干旱半干旱区生态系统凝结水的影响因素及其作用研究进展[J].生态学报,2021, 41(2):456-468.
Feng Tianjiao, Zhang Zhiqi, Zhang Lixu, et al. Review on the influencing factors and functions of condensated water in arid and semi-arid ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 456-468.
- [5] Guo Xiaonan, Wang Yanfang, Yan Haiming, et al. Dew/hoar frost on the canopies and underlying surfaces of two typical desert shrubs in Northwest China and their relevance to drought [J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127880.
- [6] 马波,田军仓,何进宇,等.宁夏中部干旱带露水形成机制及其对表层土壤水分的影响[J].水科学进展,2022, 33(6):955-966.
Ma Bo, Tian Juncang, He Jinyu, et al. The mechanisms of dew formation and its influence on surface soil water content in the central Ningxia arid belt [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(6): 955-966.
- [7] 李荣,王艳丽,吴鹏年,等.宁南旱区沟垄覆盖改善土壤水热状况提高马铃薯产量[J].农业工程学报,2017, 33(10):168-175.
Li Rong, Wang Yanli, Wu Pengnian, et al. Ridge and furrow mulching improving soil water-temperature condition and increasing potato yield in dry-farming areas of south Ningxia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 168-175.
- [8] Yin Jia de, Zhang Xu cheng, Ma Yi fan, et al. Vertical rotary sub-soiling under ridge-furrow with plastic mulching system increased crops yield by efficient use of deep soil moisture and rainfall [J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107767.
- [9] Chen Guangzhou, Wu Peng, Wang Junying, et al. Ridge-furrow rainfall harvesting system helps to improve stability, benefits and precipitation utilization efficiency of maize production in Loess Plateau Region of China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 261: 107360.
- [10] 李小雁,张瑞玲.旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J].水土保持学报,2005, 19(2):45-48.
Li Xiaoyan, Zhang Ruiling. On-field ridge and furrow rainwater harvesting and mulching combination for corn production in dry areas of Northwest China [J]. Journal

- of Soil and Water Conservation, 2005,19(2):45-48.
- [11] 苏凤梅,贾志峰,王智.地布—地膜覆盖对渭北旱塬区土壤水分的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):97-102.
Su Fengmei, Jia Zhifeng, Wang Zhi. Effects of geotextile plus plastic film mulching on soil moisture in Weibei dryland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):97-102.
- [12] 亢秀丽,王娟玲,马爱平,等.冬小麦田间集雨模式对土壤水分动态和水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):167-170.
Kang Xiuli, Wang Juanling, Ma Aiping, et al. Influence of rainwater harvesting pattern of winter wheat on soil water dynamic and water use efficiency [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(4):167-170.
- [13] 吴贤忠,李毅,汪有科.半干旱黄土丘陵区植物休眠期覆盖对土壤水热变化的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):182-186.
Wu Xianzhong, Li Yi, Wang Youke. Effects of film mulching on soil moisture and temperature changes during plant dormancy period in semiarid Loess Hilly Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):182-186.
- [14] 吴贤忠,李毅,高志永,等.白膜、黑膜全年覆盖下的土壤水、热、盐变化[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1701-1709.
Wu Xianzhong, Li Yi, Gao Zhiyong, et al. Variations in soil moisture, heat and salt under year round mulching of white and black film [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018,26(11):1701-1709.
- [15] 陈林,杨新国,翟德苹,等.柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):108-116.
Chen Lin, Yang Xinguo, Zhai Deping, et al. Effects of mulching with Caragana powder and plastic film on soil water and maize yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (2): 108-116.
- [16] 任全茂,李援农,谷晓博,等.覆膜集雨及行距配置对冬小麦灌浆特性的影响[J].节水灌溉,2017(4):1-5.
Ren Quanmao, Li Yuannong, Gu Xiaobo, et al. Effects of film-covered ridge rainwater harvesting and row spacing patterns on grain filling characteristics in winter wheat [J]. Water Saving Irrigation, 2017(4):1-5.
- [17] Mbah C N, Nwite J N, Ibeh L M, et al. Physical properties of an ultisol under plastic film and no-mulches and their effect on the yield of maize [J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2010,6(2):160-165.
- [18] 潘银珍,张文太,胡桂清,等.不同坡面微集雨措施对红花生长的影响[J].水土保持通报,2023,43(5):104-110.
Pan Yinzhen, Zhang Wentai, Hu Guiqing, et al. Effects of different micro rainwater harvesting measures on safflower growth [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):104-110.
- [19] 李尚中,樊廷录,王磊,等.不同覆膜方式对旱地玉米生长发育、产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):22-27.
Li Shangzhong, Fan Tinglu, Wang Lei, et al. Effects of different film-mulching modes on growth, yield and water use efficiency of dryland maize [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013,31(6):22-27.
- [20] Gao Yuhong, Xie Yaping, Jiang Hanyu, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching [J]. Field Crops Research, 2014,156:40-47.
- [21] 邓浩亮,张恒嘉,肖让,等.覆膜种植方式对陇东旱塬区春玉米产量的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):200-208.
Deng Haoliang, Zhang Hengjia, Xiao Rang, et al. Effects of different film-mulching planting patterns on yield of spring maize in the drought area of the eastern Gansu Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(8):200-208.
- [22] 李娟,解文强,崔婧婧,等.沟垄集雨系统垄宽对玉米水分和养分利用效率的影响[J].节水灌溉,2021(5):36-40.
Li Juan, Xie Wenqiang, Cui Jingjing, et al. Effect of ridge width on maize water and nutrient use efficiency under ridge-furrow rainfall harvesting planting mode [J]. Water Saving Irrigation, 2021(5):36-40.
- [23] 余帮强,万海霞,张国辉,等.不同集雨垄面和垄沟宽度对马铃薯产量和土壤含水量的影响[J].节水灌溉,2016(7):9-12.
Yu Bangqiang, Wan Haixia, Zhang Guohui, et al. Effects of different rainwater harvesting ridge and furrow width on yield and soil water content [J]. Water Saving Irrigation, 2016(7):9-12.
- [24] 李荣,侯贤清,贾志宽,等.沟垄全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响[J].生态学报,2013,33(7):2282-2291.
Li Rong, Hou Xianqing, Jia Zhikuan, et al. Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(7):2282-2291.
- [25] Li Weiwei, Xiong Li, Wang Changjiang, et al. Optimized ridge-furrow with plastic film mulching system to use precipitation efficiently for winter wheat production

- in dry semi-humid areas [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,218:211-221.
- [26] 易向阳,陈小兵,苏润红.增大高密度聚乙烯(HDPE)膜摩擦系数的研究[J].*中国建筑防水*,2015(10):11-14.
Yi Xiangyang, Chen Xiaobing, Su Runhong. Study on increasing of friction coefficient of high density polyethylene film [J]. *China Building Waterproofing*, 2015(10):11-14.
- [27] 杨志新.聚四氟乙烯改性材料及其应用[J].*机械工程材料*,1991,15(2):57-59.
Yang Zhixin. Polytetrafluoroethylene modified materials and its application [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1991,15(2):57-59.
- [28] 齐慧敏,胡超,李洁,等.宽温域环境中聚四氟乙烯及其复合材料摩擦学性能研究[J].*摩擦学学报*,2022,42(1):65-73.
Qi Huimin, Hu Chao, Li Jie, et al. Tribological performance of PTFE and its composite in wide temperature range [J]. *Tribology*, 2022,42(1):65-73.
- [29] 张金珠,王振华,虎胆·吐马尔白.秸秆覆盖对土柱垂直一维水分传输与蒸发的影响[J].*干旱区研究*,2015,32(5):861-868.
Zhang Jinzhu, Wang Zhenhua, Hudan Tumaerbai. Effects of straw mulch on vertical water movement and evaporation of a soil column [J]. *Arid Zone Research*, 2015,32(5):861-868.
- [30] 孙亚荣,陈云明,王亚娟,等.黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态变化特征及降雨特征对其影响[J].*水土保持学报*,2023,37(1):272-279.
Sun Yarong, Chen Yunming, Wang Yajuan, et al. Dynamic variation characteristics of soil moisture in *Caragana korshinskii* plantation in loess hilly area and the influence of rainfall characteristics on it [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(1):272-279.
- [31] 蒋文君,康银红,陈瑶,等.不同覆盖方式对土壤水热分布的影响[J].*土壤通报*,2022,53(1):74-80.
Jiang Wenjun, Kang Yinhong, Chen Yao, et al. The influence of different mulching methods on the distribution of soil water and heat [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022,53(1):74-80.
- [32] 尹鑫卫,王琦,李晓玲,等.半干旱区垄沟集雨系统点尺度土壤水分动态随机模拟[J].*生态学报*,2019,39(1):320-332.
Yin Xinwei, Wang Qi, Li Xiaoling, et al. Stochastic simulation of soil moisture dynamics at a point scale in a ridge-furrow rainwater harvesting system in a semiarid area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(1):320-332.
- [33] 任小龙,贾志宽,韩清芳,等.半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响[J].*农业工程学报*,2007,23(10):45-50.
Ren Xiaolong, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Effect of ridge and furrow rainfall harvesting planting system on production of summer corn (*Zea mays* L.) under simulated rainfall conditions in semi-arid areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007,23(10):45-50.
- [34] 王琦,张恩和,李凤民.半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较[J].*生态学报*,2004,24(8):1820-1823.
Wang Qi, Zhang Enhe, Li Fengmin. Runoff efficiency and soil water comparison of plastic-covered ridge and ridge with compacted soil at different rainfall harvesting stages in semiarid area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004,24(8):1820-1823.