

不同旱作节水灌溉条件对土壤理化性质及水稻产量的影响

何进宇^{1,2,3}, 刘飞杨¹, 马波^{1,2,3}, 王斌^{1,2,3}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021;
3. 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:为探索更为适合的水稻节水灌溉方式,于2017—2019年在宁夏暖泉农场开展大田试验,采用三因素对比设计,设置3种不同水稻节水灌溉方式(保墒旱直播MDDS、播后上水旱直播IDFS及覆膜滴灌旱作FMDI),研究了不同节水灌溉方式对水稻土壤理化性质及产量的影响。结果表明:FMDI分蘖期0~10 cm土层日平均地温3 a平均较IDFS和MDDS增加1.7℃($P<0.05$);FMDI节水效果明显,在灌溉水平为80%田间持水量条件下,依然可以保持较高的土壤含水量(3年分别为20.1%、19.9%及20.3%);MDDS和IDFS土壤紧实度分别比FMDI平均高出1.74倍、1.77倍;FMDI处理连续3 a土壤有机质、全氮、全磷和全钾较其他2种耕作处理均有显著增加;FMDI处理有显著增产作用,其3 a经济产量和收获指数均最高,与MDDS相比,FMDI的水分利用效率3个年份增幅分别为54.0%、60.0%和56.0%。综上可知,覆膜滴灌旱作(FMDI)方式为适宜该地区水稻种植的蓄水保墒、增温稳温、培肥地力和高产高效的土壤耕作覆盖措施。

关键字:水稻;旱作;节水灌溉;覆膜滴灌;土壤理化性质;产量

中图分类号:S275.6;S511.6 **文献标志码:**A

Effects of different irrigation conditions on soil physicochemical properties and rice yield

HE Jinyu^{1,2,3}, LIU Feiyang¹, MA Bo^{1,2,3}, WANG Bin^{1,2,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;
2. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To explore suitable irrigation saving methods in rice production, a large field experiment was conducted at Ningxia Nuanquan Farm from 2017–2019. A three-factor comparative design with three different rice irrigation saving methods (moisture retaining dry direct seeding MDDS, post-sowing top water dry direct seeding IDFS and mulching drip irrigation dry crop FMDI) was used in this study. The effects of different irrigation saving methods on soil physicochemical properties and yield of rice were investigated. The results showed that: (1) FMDI significantly increased the daily average ground temperature in 0~10 cm during tillering stage by 1.7℃ on average in 3 years ($P<0.05$). (2) FMDI had obvious water saving effect, still maintaining high soil water content under irrigation level of 80% field water holding capacity (20.1%, 19.9% and 20.3% respectively in three years). (3) The soil compaction of MDDS and IDFS are 1.74 and 1.77 times higher than FMDI respectively. (4) There was a significant increase in soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the FMDI treatment for 3 consecutive years compared to the other two tillage treatments. (5) There was a significant yield increase in the FMDI

收稿日期:2022-01-19

修回日期:2022-05-20

基金项目:宁夏重点研发项目(引才专项)(2018BEB04013);宁夏自然科学基金(2019AAC03067);宁夏高等学校一流学科建设项目(NXY-LXK2021A03);第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018058);宁夏大学博士科研启动基金项目(00001030900002218)

作者简介:何进宇(1986-),男,宁夏银川人,副教授,博士,硕士生导师,主要从事农业水生态与水土资源高效利用研究。E-mail: hejinyu2017@163.com

treatment, which had the highest 3-year economic yield and harvest index, while the 3-year FMDI water use efficiency increase was 54.0%, 60.0% and 56.0%, respectively. Therefore, the mulching drip irrigation dry crop (FMDI) was the most suitable soil tillage cover measure for this area's rice production in terms of water storage and moisture conservation, temperature increase and stabilization, land fertilization and high yield efficiency.

Keywords: rice; dry crop; mulch drip irrigation; soil physical and chemical properties; yield

水稻作为标志性粮食作物,在宁夏粮食生产和国民经济中占有举足轻重的位置^[1]。宁夏银川平原属于干旱地区,年均降水量偏少且分布不均,造成春旱接连夏旱,同时强烈蒸发造成水资源严重浪费,导致传统稻田出现土壤板结、土壤肥力降低和次生盐渍化等问题,严重影响了该地区水稻的可持续发展^[2];此外,低温冷凉、积温不足,也是限制该地区水稻生产的主要因素^[3-4]。水稻旱作可有效缓解土壤板结,增加土壤通透性,提高土壤蓄水能力和作物水分利用效率^[5-6]。前人研究多侧重单一的水稻耕作方式对土壤环境和产量的影响,研究周期相对较短^[7-8]。针对旱作、覆膜、滴灌等耕作覆盖技术相结合下较长周期内土壤水肥热及水稻产量变化的研究鲜有报道。本研究采用水稻不同耕作处理及地膜覆盖相结合的模式,分析耕作处理、地膜覆盖及二者交互对宁夏旱区土壤理化性状及水稻产量变化的影响,以期明确适合该地区的蓄水保墒、增温稳温、培肥地力和节水稳产高效土壤耕作覆盖措施,为宁夏干旱地区旱作水稻可持续发展提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017—2019 年在宁夏暖泉农场试验基地(38°39'N,106°41'E,海拔 1 010 m)进行,该地区属于典型的干旱地区,年平均降水量 188.5 mm,年平均日照时数 2 858.2 h,年平均蒸发量 1 950 mm,年平均气温 10.7℃,昼夜温差大。供试土壤为灌淤土,2017 年播种前耕层(0~60 cm)土壤有机质含量为 11.7 g·kg⁻¹,全氮为 0.57 g·kg⁻¹,全磷为 0.73 g·kg⁻¹,全钾为 24.1 g·kg⁻¹,碱解氮为 52.8 mg·kg⁻¹,速效磷为 9.6 mg·kg⁻¹,速效钾为 155.4 mg·kg⁻¹,pH 值 8.57,田间持水量为 25.2%。

1.2 试验设计

大田试验采用三因素对比设计,试验因素为不同旱作节灌方式,因素 1:播后上水旱直播(Irrigation after dry farming sowing, IDFS),此方法为在机械直播后立即上水并保持薄水层;因素 2:保墒旱直播

(Moisture-saving dry direct seeding, MDDS),此方法为在保持土壤墒情条件下进行机械旱直播,当水稻生长至 3~4 片叶时建立水层;因素 3:覆膜滴灌旱作(Farming with mulch drip irrigation, FMDI),此方法为采用一垄两行覆膜种植,利用滴灌带进行湿润灌溉。每个节灌方式设置 1 个试验小区,面积为 660 m²(22 m×30 m),重复 3 次。供试水稻品种为富源 4 号(96D10),属于粳稻型,全生育期 150 d 左右。2017—2019 年播种期分别为 5 月 3 日、5 月 1 日和 5 月 2 日,出苗期分别为 5 月 24 日、5 月 23 日和 5 月 26 日,测产收获期分别为 10 月 5 日、10 月 3 日和 10 月 4 日。IDFS 和 MDDS 水源来自引黄自流灌溉, IDFS 全生育期灌溉定额为 1 200 m³·hm⁻², MDDS 全生育期灌溉定额为 1 000 m³·hm⁻²; FMDI 水源来自水泵抽取试验点地下水,经首部枢纽过滤器过滤泥沙后进行滴灌,全生育期灌溉定额为 800 m³·hm⁻²。供试氮肥为水溶性尿素(N:180 kg·hm⁻²),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅:90 kg·hm⁻²),钾肥为氯化钾(K₂O:180 kg·hm⁻²),以基肥方式在播种时全部施入土壤,旋耕深度均保持 30 cm,其余田间中耕管理措施保持一致。

1.3 测定项目及方法

土壤水分及水分利用效率:采用烘干法定期测定 0~60 cm 土层土壤含水量;水分利用效率(WUE, kg·m⁻³)=水稻经济产量/生育期耗水量。

水稻耗水量:耗水量可根据整个生育期中任何一个时段(*t*)土壤计划湿润层(*H*)内储水量的变化,用水量平衡方程表示:

$$ET = P + K + M - (W_t - W_0)$$

式中,ET 为时段 *t* 内的作物耗水量(m³·hm⁻²);*P* 为时段 *t* 内的有效雨量(m³·hm⁻²);*K* 为时段 *t* 内的地下水补给量(m³·hm⁻²);*M* 为时段 *t* 内的灌溉水量(m³·hm⁻²);*W*₀、*W*_{*t*} 分别为时段初和时段 *t* 时计划湿润层 *H* 的储水量(m³·hm⁻²)。

土壤温度:在每个小区分别埋设 3 组地温计测定水稻分蘖期 0~10 cm 土层土壤温度。

土壤紧实度:利用 SC-900 土壤紧实度仪于水

稻分蘖期(2017-06-04、2018-06-03、2019-06-06)对不同处理 0~60 cm 土层土壤紧实度进行测定。

土壤养分:在水稻分蘖期,分层采集 0~60 cm 土层土壤样品,测定有机质、全氮、全磷和全钾含量,土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,全钾采用火焰光度法测定^[9]。

考种与产量:水稻成熟后,每个处理小区内分 3 个不同位置各采 3 组样品,自然晾干后,进行考种,分别测定株高、单株地上部干重、千粒重、饱籽率、经济产量和生物产量等指标,并计算收获指数(收获指数=经济产量/生物产量)。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2019 和 SPSS 19 软件进行数据处理及分析,采用最小显著差异法(Least Significant Difference, LSD)进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对表层土壤温度的影响

由表 1 可知,FMDI 较 IDFS 和 MDDS 显著提高了水稻分蘖期土壤表层(0~10 cm)日平均地温,其中 2017 年日平均地温分别提高了 1.5℃ 和 0.7℃,2018 年分别提高了 1.2℃ 和 0.6℃,2019 年分别提高了 1.4℃ 和 0.6℃;由于不同年份气温不同,以及连续相同耕作覆盖方式使得稻田土壤物理结构发生一定程度变化^[10-11],因此不同年份地温变化幅度不同,但整体趋势一致,地膜覆盖显著改善了土壤热量^[12-13],FMDI 处理 3 年平均较 IDFS 和 MDDS 使分蘖期土壤表层(0~10 cm)日平均地温增加 1.7℃。

2.2 不同处理对水稻分蘖期土壤含水量的影响

由表 2 可知,IDFS 和 MDDS 采用“浅-薄-湿-晒”水分控制方式,故在分蘖期处于自然落干状态,土壤水分基本保持在 90%田间持水量水平。FMDI 控制灌溉水平为 80%田间持水量,但由于覆膜对土壤具有较好的蓄水保墒效应^[14],故在非充分灌溉条件下,依然可以保持>80%田间持水量,结合本团队前期膜下滴灌旱作水稻水分生产函数模型试验结论,当土壤水分保持在 80%田间持水量以上,其产量和品质不降反增^[15]。

2.3 不同处理对水稻分蘖期土壤紧实度的影响

2017—2019 年稻田 0~60 cm 土层土壤紧实度结果表明(图 1),FMDI 土壤紧实度显著低于 IDFS

和 MDDS,尤其在表层土壤较为明显,可能是因为 IDFS 和 MDDS 在建立水层落干后,土壤板结更为严重^[16]。2017 年 IDFS 和 MDDS 分别比 FMDI 平均高出 1.45 倍和 1.50 倍;2018 年 IDFS 和 MDDS 分别比 FMDI 平均高出 1.55 倍和 1.52 倍;2019 年 IDFS 和 MDDS 分别比 FMDI 平均高出 1.48 倍和 1.50 倍。同时,随着耕作年限的增加,不同耕作覆盖处理对深层土壤影响差距逐渐显现,3 年 MDDS 30~60 cm 土层土壤紧实度比 FMDI 平均依次高出 1.11 倍、1.18 倍和 1.21 倍;IDFS 30~60 cm 土层土壤紧实度比 FMDI 平均依次高出 1.02 倍、1.15 倍和 1.2 倍。其中深层土壤最大差距出现在 2019 年 10~20 cm 处,此时 IDFS 和 MDDS 土壤紧实度分别比 FMDI 平均高出 1.74 倍和 1.77 倍。

2.4 不同处理对水稻 0~20 cm 土层土壤肥力的影响

连续 3 a 不同耕作覆盖处理后,稻田土壤肥力状况显著不同(表 3),FMDI 处理 0~20 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷和全钾较其他 2 种耕作处理均有显著($P<0.05$)增加。2019 年 FMDI 土壤有机质较 MDDS 和 IDFS 分别提高 7.8%和 6.8%,FMDI 全氮较 MDDS 和 IDFS 分别提高 8.9%和 7.0%,FMDI 全磷较 MDDS 和 IDFS 分别提高 2.7%和 5.6%,FMDI 全钾较 MDDS 和 IDFS 分别提高 4.5%和 5.8%。

表 1 不同处理水稻分蘖期土壤表层(0~10 cm)日平均地温/℃
Table 1 Daily average ground temperature of 0~10 cm soil surface layer at tillering stage of rice under different treatments

处理 Treatment	时间 Time(y-m-d)		
	2017-05-23 —06-13	2018-05-26 —06-16	2019-05-23 —06-13
MDDS	25.9b	22.1b	23.5b
IDFS	26.7b	22.7b	24.3a
FMDI	27.4a	23.3a	24.9a

注:同列中不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$),下同。

Note: Different capital letters within the same column mean significant differences among treatments ($P<0.05$), the same below.

表 2 不同处理水稻分蘖期 0~60 cm 土层土壤平均含水量/%
Table 2 Average soil water content of 0~60 cm layer under different treatments at tillering stage of rice

处理 Treatment	年份 Year		
	2017	2018	2019
MDDS	23.2a	24.4a	24.9a
IDFS	23.2a	23.1b	24.3b
FMDI	20.1b	19.9c	20.3c

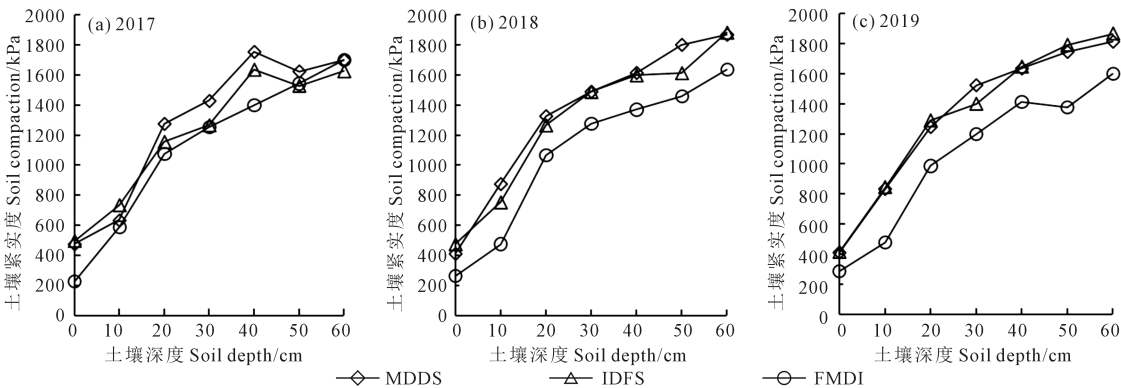


图 1 不同处理水稻分蘖期 0~60 cm 土层土壤紧实度

Fig.1 Soil compaction of 0~60 cm depth under different treatments at tillering stage of rice

2.5 不同处理对水稻产量构成的影响

如表 4 所示,与当地传统水稻多年平均经济产量(6 256.85 kg · hm⁻²)相比,不同年份旱作节灌方式均有显著($P<0.05$)增产效果,增产效果依次是 FMDI>IDFS>MDDS。2017 年 FMDI 较 MDDS 和 IDFS 经济产量分别增加 6.57%和 4.61%,2018 年 FMDI 较 MDDS 和 IDFS 经济产量分别增加 12.43%和 2.41%,2019 年 FMDI 较 MDDS 和 IDFS 经济产量分别增加 12.96%和 4.06%;由于不同年度土壤水热条件不同,增产幅度有所不同。2018 年土壤温度较低,FMDI 处理蓄水保墒作用不明显,因此增产幅度略低。FMDI 处理产量的增加,主要是由于饱籽率和千粒重的增加,通过产量构成因素的积累,较 MDDS 显著增加了经济产量;而株高和地上部干重与 IDFS 之间差异不显著,导致这 2 种旱作节灌方式处理间生物产量差异不显著。受经济产量的直接影响,FMDI 收获指数较 IDFS 有所提升,但显著高于 MDDS;2017 年 FMDI 较 MDDS 和 IDFS 收获指数分别提高 5.57%和 2.09%,2018 年分别提高 9.80%和 4.47%,2019 年分别提高 11.52%和 5.29%。所有处理中 FMDI 处理的经济产量和收获指数最高。

2.6 不同处理对水稻耗水量和水分利用效率的影响

如图 2 所示,2017—2019 年份间不同耕作覆盖处理下耗水量不同,导致水稻在生产水平上的水分利用效率显著($P<0.05$)不同。IDFS 水分利用效率显著高于 MDDS,3 年增幅分别为 7.0%、8.0%和 3.0%;而 FMDI 节水效果明显,在仅有一半耗水量的情况下,依然可以达到较高的产量,故其水分利用效率显著提高,FMDI 的水分利用效率较 MDDS 处理 3 年增幅分别为 54.0%、60.0%和 56.0%,故在节水保产为目标的情况下,FMDI 处理是较好的水稻旱作节灌方式。

表 3 2019 年不同处理水稻分蘖期 0~20 cm 土层土壤有机质和全量养分含量/(g · kg⁻¹)

Table 3 Soil organic matter and total nutrient content in 0~20 cm layer of rice tillering stage under different treatments in 2019

处理 Treatment	土壤有机质 Soil organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
MDDS	11.6b	0.56b	0.74b	24.6b
IDFS	11.7b	0.57b	0.72b	24.3b
FMDI	12.5a	0.61a	0.76a	25.7a

表 4 2017—2019 年不同处理水稻产量构成和相关性状

Table 4 Yield components and related shapes of rice under different treatments in 2017–2019

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	单株地上部干重 Shoot dry weight per plant/g	饱粒率 Fulfilled grain percentage/%	千粒重 Thousand-grain weight/g	经济产量 Economic yield / (kg · hm ⁻²)	生物产量 Biological yield / (kg · hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%
2017	MDDS	77.45b	1.65b	0.84b	25.63b	8232.17b	16342.8b	50.4b
	IDFS	79.43a	1.66a	0.85a	25.67a	8386.74a	16229.6a	51.7a
	FMDI	80.37a	1.67a	0.86a	25.70a	8773.16a	16498.2a	53.2a
2018	MDDS	86.54b	1.61b	0.83b	24.99b	7803.25b	16112.3b	48.4b
	IDFS	87.23a	1.63a	0.85a	25.17b	8566.87a	16823.5a	50.9a
	FMDI	87.37a	1.64a	0.86a	25.20a	8631.68a	16823.4a	51.3a
2019	MDDS	77.55b	1.63b	0.84b	25.15b	7766.46b	16287.5b	47.7b
	IDFS	79.39b	1.66a	0.86a	25.18a	8431.13a	16693.2a	50.5a
	FMDI	80.58a	1.69a	0.88a	25.25a	8758.25a	16326.8a	53.6a

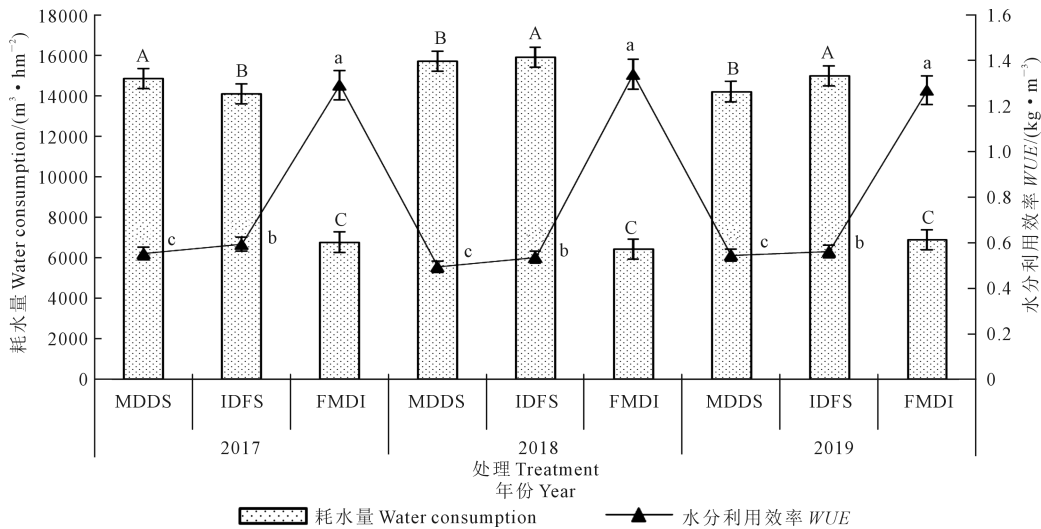


图 2 不同处理水稻耗水量及水分利用效率
Fig.2 Rice water consumption and WUE of different treatments

3 讨 论

低温冷凉、积温不足是限制宁夏寒、旱地区粮食作物增产的一个重要因素,水稻作为喜温作物,对低温环境的耐受程度较差,即使较小幅度的温差,也会对水稻的生长造成显著影响^[17-18]。水具有较高比热值,随环境温度变化,水层可对水稻秧苗起到保护作用,而覆膜能更好地达到保水保墒保温的效果。本研究表明,覆膜处理 3 a 平均较不覆膜处理增加水稻分蘖期表层(0~10 cm)日平均地温 1.7℃。这可能是因为土壤温度主要受土壤热容量与热传导率影响,土壤颗粒与水分相比,具有较低的热容量和较高的热传导率,造成土壤含水量较高,土壤的温度变化幅度较小。地膜覆盖显著的增温作用和前人的研究结果相同^[19-20]。

合理的耕作覆盖方式有利于改善播期耕层土壤水分状况^[21],为旱作水稻的出苗保苗和分蘖拔节创造良好的土壤环境。本试验结果表明,保墒早直播和播后上水旱直播方式因为具有较高的灌溉水量,其土壤水分状况保持在较高的水平,但会增加土壤的表层水分无效蒸发^[22];而覆膜滴灌方式由于较好的蓄水保墒能力^[23],即使在非充分灌溉的条件下,依然可以让土壤水分保持在满足水稻生长的水平,起到了较好的节水稳产效果。

土壤紧实度是直接关系到作物出苗与根系生长的关键因素^[24],其过高或过低都不利于旱作水稻的出苗保苗以及生长发育。本试验结果表明,3 a 保墒早直播和播后上水旱直播 0~30 cm 土层土壤紧实度比覆膜滴灌旱作平均高出 1.45 倍、1.51 倍,30

~60 cm 土层土壤紧实度比覆膜滴灌旱作平均高出 1.17 倍、1.13 倍;这说明在同样旋耕 30 cm 的条件下,覆膜滴灌旱作方式可较好地保持表层土壤通气性,但在深层土壤中,并未打破犁底层,建议通过深松来打破旧犁底层,增加耕层厚度,构造新的犁底层,结合 FMDI,达到蓄墒保墒保肥的目的。

本试验结果表明,覆膜滴灌旱作较保墒早直播及播后上水旱直播方式,其全氮含量显著提高,这是因为地膜覆盖能增加耕层土壤全养分的含量^[25],其增温保墒效应促进了土壤养分的转化、释放和吸收^[26]。合理的耕作方式和覆盖不但可以改善土壤的水、肥、气和热状况,同时有利于作物的生长发育,最终提高旱地作物的产量。本试验中,覆膜滴灌方式具有蓄水保墒、增温稳温和培肥土壤等效应,因此其连续 3 a 水稻经济产量和生物产量均较保墒早直播方式显著增加,增产原因主要是饱籽率和千粒重的增加。又因为覆膜滴灌具有较好的节水效果,故其水分利用效率也明显优于其他 2 种植植方式,地膜覆盖的增温保墒节水和提质增产效应再一次得到验证。

4 结 论

与保墒早直播及播后上水旱直播方式相比,覆膜滴灌旱作方式在宁夏银川平原地区,可协调土壤水-肥-气-热关系,起到蓄水保墒、增温稳温和培肥地力的作用,最终达到增产节水的目的,是目前低温冷凉、春旱频发和土壤肥力持续下降地区较为理想的水稻节灌种植方式,本试验中采用的一垄两行覆膜滴灌方式是较为推荐的节水增产技术措施。

参 考 文 献:

[1] 何进宇,田军仓. 膜下滴灌旱作水稻水肥耦合模型及组合方案优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 77-82.
HE J Y, TIAN J C. Model of coupling water with fertilizer and optimum combination scheme of rice cultivated in aerobic soil with drip irrigation under plastic film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(13): 77-82.

[2] 何进宇.膜下滴灌水稻水-肥-盐-产量规律及优化灌溉制度研究[D].银川:宁夏大学,2017.
HE J Y. Study on water-fertilizer-salt-yield regularity and optimal irrigation schedule of rice by drip irrigation under plastic film[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2017.

[3] 周佳,周灵芝,劳承英,等. 短期不同耕作方式对水稻根际土壤细菌群落结构多样性的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(10): 2401-2411.
ZHOU J, ZHOU L Z, LAO C Y, et al. Effects of short-term different tillage methods on the diversity of bacterial community in rice rhizospheresoils[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(10): 2401-2411.

[4] 李华兴,卢维盛,刘远金,等. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 553-556.
LI H X, LU W S, LIU Y J, et al. Effect of different tillage methods on rice growth and soil ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 553-556.

[5] ISLAM M A, DE BRUYN L L, WARWICK N W M, et al. Salinity-affected threshold yield loss: a signal of adaptation tipping points for salinity management of dry season rice cultivation in the coastal areas of Bangladesh[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112413.

[6] 刘会,刘宏金,王金玲,等. 全生物降解地膜降解特性及其对水稻旱作产量的影响[J]. 北方农业学报, 2021, 49(1): 71-76.
LIU H, LIU H J, WANG J L, et al. Degradation characteristics of full biodegradable mulching film and its effect on non-flooding rice yield[J]. Journal of Northern Agriculture, 2021, 49(1): 71-76.

[7] 王子阳,陈婉华,袁伟,等. 长期秸秆还田与耕作方式对水稻产量及品质的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(3): 17-20, 29.
WANG Z Y, CHEN W H, YUAN W, et al. Effects of long-term straw returning and tillage ways on yield and quality of rice[J]. China Rice, 2021, 27(3): 17-20, 29.

[8] 周文涛,毛燕,唐志伟,等. 长期定位试验不同耕作方式与秸秆还田对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 中国稻米, 2021, 27(5): 45-49.
ZHOU W T, MAO Y, TANG Z W, et al. Effects of different tillage methods and straw returning on rice yield and rice quality under long-term location experiment[J]. China Rice, 2021, 27(5): 45-49.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[10] 张陆勇,胡炼,EVANS A,等. 耕种模式对稻田土壤物理特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019,(8): 35-38.
ZHANG L Y, HU L, EVANS A, et al. Effects of cultivation modes on soil physical characteristics of rice fields[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019,(8): 35-38.

[11] 白应刚,王静,周韦,等. 稻草还田和不同耕作方式对直播稻田土壤理化性状及经济效益的影响[J]. 湖南农业科学, 2019,(6): 15-17.
BAI Y G, WANG J, ZHOU W, et al. Effects of straw returning and different tillage methods on soil physical and chemical properties and economic benefits of direct seeding paddy field[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019,(6): 15-17.

[12] ZHANG X D, YANG L C, XUE X K, et al. Plastic film mulching stimulates soil wet-dry alternation and stomatal behavior to improve maize yield and resource use efficiency in a semi-arid region[J]. Field Crops Research, 2019,233: 101-113.

[13] 霍铁珍,丁春莲,银花,等. 不同材料覆盖对马铃薯田土壤水热状况及产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 90-94.
HUO Y Z, DING C L, YIN H, et al. Effects of different mulching materials on soil moisture-heat condition and yield of potato[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(1): 90-94.

[14] TANG M, LI H C, ZHANG C, et al. Mulching measures improve soil moisture in rain-fed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) orchards in the loess hilly region of China[J]. Sustainability, 2021, 13(2): 610.

[15] 何进宇,田军仓,马波,等. 膜下滴灌旱作水稻水分生产函数研究[J]. 西北农业学报, 2015, 24(11): 41-48.
HE J Y, TIAN J C, MA B, et al. Water production function of paddy rice in aerobic soil with drip irrigation under plastic film[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(11): 41-48.

[16] 涂张焕,丰文庆,徐唐奇. 土壤板结原因分析及其对作物吸水性的影响研究[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(12): 71-73.
TU Z H, FENG W Q, XU T Q. Cause analysis of soil hardening and its effect on crops water-absorbing[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2020, 66(12): 71-73.

[17] 苗微,刘佳敏,张佳,等. 稻蟹共作对田间生态环境与水稻生长的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2785-2791.
MIAO W, LIU J M, ZHANG J, et al. Effects of rice-crab coculture on field ecological environment and rice growth: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8): 2785-2791.

[18] 何军,张宇航,叶磊,等. 间歇灌溉缓释肥施肥水平对水稻生长特性及产量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2021,(3): 103-107.
HE J, ZHANG Y H, YE L, et al. The effects of slow-release fertilizer levels on rice growth characteristics and yields under alternate wetting and drying[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021,(3): 103-107.

[19] 霍铁珍,丁春莲,王文达,等. 黑色地膜覆盖土壤水热效应及对玉米产量的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 335-339.
HUO Y Z, DING C L, WANG W D, et al. Effects of black plastic film mulching on soil moisture, soil temperature and maize yield[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 335-339.

[20] 刘春芬,刘文兆,林文,等. 黄土塬区不同地膜覆盖度下土壤水热状况研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 62-67.
LIU C F, LIU W Z, LIN W, et al. Soil hydrothermal status under different degrees of film mulching coverage on the loess tableland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 62-67.

[21]

蔡丽君,边大红,田晓东,等. 耕作方式对土壤理化性状及夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(5): 232-238.
CAI L J, BIAN D H, TIAN X D, et al. Effect of tillage methods on soil physical and chemical properties, growth and grain yield of summer maize [J]. ActaAgriculturaeBoreali-sinica, 2014, 29 (5): 232-238.

[22]

张兴娟,王志敏,郭文忠,等. 灌溉后不同处理方式对土壤水分蒸发过程的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 74-78.
ZHANG X J, WANG Z M, GUO W Z, et al. Influences of different treatments on soil evaporation after irrigation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(1): 74-78.

[23]

齐智娟,冯浩,张体彬,等. 覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 108-113.
QI Z J, FENG H, ZHANG T B, et al. Effects of mulch and tillage methods on soil water and temperature as well as corn yield in Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 108-113.

[24]

程思贤,刘卫玲,靳英杰,等. 深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1355-1365.
CHENG S X, LIU W L, JIN Y J, et al. Effects of subsoiling depth on topsoil properties, crop yield and water use efficiency in Lime Concretion Black soil[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2018, 26(9): 1355-1365.

[25]

李云光,王振华,张金珠,等. 滴灌条件下液体膜覆盖土壤保温保湿效应及棉花生长响应[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1170-1175.
LI Y G, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. Effects of liquid film mulching on soil temperature, moisture and the growth of cotton under drip irrigation[J]. Soils, 2015, 47(6): 1170-1175.

[26]

丁运韬,程煜,张体彬,等. 利用 HYDRUS-2D 模拟膜下滴灌玉米农田深层土壤水分动态与根系吸水[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 23-32.
DING Y T, CHENG Y, ZHANG T B, et al. Modeling of dynamics of deep soil water and root uptake of maize with mulched drip irrigations using HYDRUS-2D [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 23-32.

[32]

朱铁霞,王琳,高阳,等. 干旱-复水对菊芋苗期根、茎、叶形态特征的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(11): 2309-2315.
ZHU T X, WANG L, GAO Y, et al. Effect of drought stress and re-watering on the morphological characteristics of root, stem, and leaf in *Helianthus tuberosus* [J]. Pratacultural Science, 2017, 34(11): 2309-2315.

[33]

斯琴巴特尔,吴红英. 不同逆境对玉米幼苗根系活力及硝酸还原酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(2): 67-70.
SECHENBATER, WU H Y. Effect of different stress on roots activity and nitrate reductase activity in *Zea mays* L. [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(2): 67-70.

[34]

肖钢,蔡焕杰,沐青,等. 夏玉米苗期对不同时长干旱-复水的生理响应机制[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 57-63.
XIAO G, CAI H J, MU Q, et al. Physiological response mechanism of summer maize seedlings to drought-rewatering of different durations [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 57-63.

[35]

郑清岭,杨忠仁,张凤兰,等. 沙芥属植物活性氧清除系统对干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2018, 38(9): 1674-1682.
ZHENG Q L, YANG Z R, ZHANG F L, et al. Responses of reactive oxygen species scavenging system to drought stress in *Pugionium Gaertn* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(9): 1674-1682.

[36]

张红萍,牛俊义,轩春香,等. 干旱胁迫及复水对豌豆叶片脯氨酸和丙二醛含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2008, 43(5): 50-54.
ZHANG H P, NIU J Y, XUAN C X, et al. Effects of drought stress and rewatering on content of proline and malondiadehyde in pea leaves[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2008, 43(5): 50-54.

[37]

闫江艳. 干旱胁迫及复水对不同黍稷品种生理生态性的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2012.
YAN J Y. Effects of drought stress and rewatering on physiological and ecological characteristics of different millet varieties [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2012.

[38]

孙昊,王茜,关旻,等. 粗毛鳞盖蕨干旱胁迫下生理变化规律的研究[J]. 植物科学学报, 2013, 31(6): 576-582.
SUN H, WANG Q, GUAN Y, et al. Effects of *Microlepia strigosa* under drought stress on physiological change laws [J]. Plant Science Journal, 2013, 31(6): 576-582.

[39]

庄伟伟,李进,曹满航,等. 盐旱交叉胁迫对银沙槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(6): 730-736.
ZHUANG W W, LI J, CAO M H, et al. Effects of salt-drought inter-cross stress on physiological and biochemical characteristics of *Ammodendron argenteum* (Pall.) kuntze seedlings [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2010, 28(6): 730-736.

[40]

韩金龙,王同燕,徐子利,等. 玉米抗旱机理及抗旱性鉴定指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 142-146.
HAN J L, WANG T Y, XU Z L, et al. Research advances for mechanism and identification index on drought resistance in maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(21): 142-146.

(上接第 100 页)