

集雨种植模式下不同施肥水平对土壤水分消耗及冬小麦产量的影响

王珂^{1,2}, 卫婷^{1,2}, 董昭芸^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 贾志宽^{1,2}

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
2. 农业部旱地作物生产与生态重点开放实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 于 2012—2014 年在宁南旱塬区布设旱地冬小麦垄膜沟播试验, 研究了集雨种植模式下不同施肥水平对小麦不同生育阶段土壤水分、产量和水肥利用率的影响。试验设置集雨(R)和传统平作(B)两种种植模式, 每种种植模式设置高(N+P: 270+180 kg·hm⁻²)、中(N+P: 180+120 kg·hm⁻²)、低(N+P: 90+60 kg·hm⁻²)和不施肥 4 种施肥水平。结果表明: 集雨种植模式在冬小麦生育前期可以显著提高 0~200 cm 土层的土壤贮水量, 两年的平均产量较平作提高了 10.57% ($P<0.05$), 水分利用效率提高了 3.83%, 肥料农学效率提高了 54.99% ($P<0.05$)。施肥对冬小麦生育期土壤水分有明显影响, 冬小麦生育前期随着施肥量的增加土壤贮水量呈增加趋势, 生育后期土壤贮水量随着施肥量的增加而减少。无论是集雨还是平作种植模式, 各施肥处理的冬小麦经济产量和水分利用效率随着施肥量的增加呈增加趋势, 但相邻肥力梯度间增幅随施肥量的增加逐渐降低, 高肥处理虽产量和水分利用效率最高, 但较中肥处理增产幅度不显著 ($P>0.05$), 集雨种植中肥处理的肥料农学效率最高, 两年平均为 3.91 kg·kg⁻¹。由此认为, 集雨种植模式配合中量施肥(N+P: 180+120 kg·hm⁻²)可显著提高半干旱区旱作冬小麦产量及水肥利用效率。

关键词: 集雨种植; 施肥水平; 土壤水分; 旱作小麦; 产量; 半干旱区
中图分类号: S318; S512.1 **文献标志码:** A

Effects of fertilizer application rates on soil water use and wheat yield under ridge-furrow practice with plastic mulching of the ridge

WANG Ke^{1,2}, WEI Ting^{1,2}, DONG Zhao-yun^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, JIA Zhi-kuan^{1,2}

(1. The Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Key Laboratory of Crop Physi-ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau, Minister of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the effects of the different chemical fertilizer application levels on soil moisture, grain yield, water use efficiency (WUE) and fertilizer agronomic efficiency(AE) under Ridge – furrow Rainfall Harvesting Planting pattern. A 2 – year field experiment was conducted in semi – arid areas of southern Ningxia from Sept. 2012 to June 2014. Two cultivation patterns (R: ridge – furrow cultivation and F: conventional flat cultivation) and four chemical fertilizer rates (H: 270 + 180 kg · hm⁻², M: 180 + 120 kg · hm⁻², L: N + P: 90 + 60 kg · hm⁻², 0) were performed in this study. The results showed that soil water storages at 0 ~ 200 cm layers were significantly higher in R treatments than that of B treatments at the early growth stage of winter wheat. Yield, WUE and AE of wheat were larger in R, which were 10.57% ($P<0.05$), 3.83% and 54.99% ($P<0.05$) higher than that of B, respectively. Fertilization had significant effect on soil water storage during wheat growth period. At the early growth stage of winter wheat, soil water storage increased as fertilizer level increased. At late growth stage, soil water storage decreased as fertilizer level increased. Under both cultivation patterns, yield and WUE of winter wheat increased with the rising of fertilizer application. However, the increase amplitude of yield and WUE between adjacent fertility gradient be-

收稿日期: 2015-02-09
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题“西北旱作区抗逆稳产旱作农业技术集成与示范”(2012BAD09B03); “十二五”国家科技支撑计划课题“西北旱区农业水土资源潜力与高效利用模式集成及应用”(2011BAD29B09); “十二五”国家 863 课题“旱作冬小麦水肥联合调控效应研究”(2011AA100504)
作者简介: 王珂(1989—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事旱地节水农业研究。E-mail: 729036134@qq.com。
通信作者: 贾志宽(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区农业水分高效利用研究。E-mail: zhikuan@tom.com。

came smaller gradually with the increasing of fertilizer application. RH was the recommended treatment in terms of yield and WUE. AE of wheat was the largest in RM which averaged $3.91\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in two trial years. Therefore, the ridge-furrow rainfall harvesting planting pattern with middle fertilizer application ($180 + 120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) could significantly increase grain yield and WUE of winter wheat.

Keywords: ridge and furrow rainfall harvesting planting pattern; fertilizer application levels; soil moisture; rainfed wheat; yield; semiarid areas

我国北方旱作区土壤贫瘠、抗蚀抗旱能力差,粮食产量低而不稳^[1];作物水肥利用率低是该区农业生产发展中面临的重要问题^[2-3]。旱作农业中,水肥具有明显的耦合关系,肥料的增产作用不仅在于肥料本身,更重要的还在于与土壤水分的互作^[4-6]。北方旱作区除水资源不足外,供肥能力差是限制作物产量提高的另一因素。目前广泛推广的旱地垄沟集雨种植技术通过沟内集雨及垄上覆盖抑制土壤水分蒸发,使作物需水条件得到显著改善^[7-11]。在此基础上,如何优化养分投入数量是旱地冬小麦增产和水分、养分高效利用的关键^[12]。

以往旱地集雨种植模式的研究与生产实践多关注集雨保墒效果等问题,至于配套的相应施肥水平以及对作物产量的水肥耦合效果未见相关文献报道。本研究在宁南旱塬区布设旱地冬小麦垄沟播试验,研究不同施肥量处理对土壤水分消耗及小麦产量的影响,为完善旱地集雨种植技术及制定相应

的施肥策略提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012 年 9 月—2014 年 6 月在宁夏回族自治区彭阳县长城村旱地农业试验区进行。试验区地处 $106^{\circ}48'E, 35^{\circ}51'N$, 海拔 1 658 m, 地貌类型属黄土高原腹部梁峁丘陵地。该地区年平均降水量 430 mm 左右, 其中 70% 的降雨集中在 7—9 月份。年平均气温 $6.1^{\circ}C$, 年平均日照时数 2 518.2 h, 年蒸发量 1 753.2 mm, 干燥度 ($\geq 0^{\circ}C$ 的蒸发量) 为 1.21 ~ 1.99, 无霜期 140 ~ 160 d。试验田为旱平地, 土壤质地为黄绵土。耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤基础养分为: 有机质 $15.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $63.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $37.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $161.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2012—2014 年试验期的降雨量具体分布见表 1。

表 1 2012—2014 年冬小麦生育期降雨量分布/mm
Table 1 Rainfall distribution of maize growth period from 2012 to 2014

年份 Year	播种 ~ 苗期 Sowing ~ seedling	苗期 ~ 返青 Seedling ~ returning green	返青 ~ 拔节 Returning green ~ jointing	拔节 ~ 抽穗 Jointing ~ heading	抽穗 ~ 灌浆 Heading ~ filling	灌浆 ~ 收获 Filling ~ maturing	总和 Total
2012—2013	42.0	24.5	5.2	33.8	90.4	47.8	243.7
2013—2014	52.6	47.6	65.5	7.5	17.5	7.2	197.9

1.2 试验设计

本试验设置集雨种植和传统平作两种栽培方式, 每种栽培方式设置高、中、低三种施肥水平: 高 ($N + P: 270 + 180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, H)、中 ($N + P: 180 + 120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, M)、低 ($N + P: 90 + 60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, L), 不施肥作为对照。采用随机区组设计, 共 8 个处理, 各处理 3 次重复: 集雨高肥 (RH)、集雨中肥 (RM)、集雨低肥 (RL)、集雨无肥 (R0), 平作高肥 (BH)、平作中肥 (BM)、平作低肥 (BL)、平作无肥 (B0)。田间试验中各处理种植小区面积为 72 m^2 ($12\text{ m} \times 6\text{ m}$), 集雨处理沟垄宽度均为 60 cm, 垄上覆膜, 垄高为 15 cm; 播前整地、起垄、覆膜、施肥, 集雨种植区肥料均作基肥 (包括垄面积的施肥量) 一次全部施于种植沟内, 第一年于 2012 年 9 月 16 日播种, 2013 年 7 月 3 日收

获, 第二年于 2013 年 9 月 16 日播种, 2014 年 7 月 5 日收获, 冬小麦生育期不进行灌溉。供试品种为陇鉴 301, 播量为 $190\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 播种方式为条播, 集雨处理每种植沟内条播 4 行小麦, 集雨和平作各处理行距均为 20 cm。

1.3 试验方法

产量: 平作处理小麦收获后每小区取长势有代表性的相邻 5 行, 长度为 1 m 区域的小麦, 取样面积为 1 m^2 (行长 1 m $\times$ 宽 1 m)。集雨处理每小区取一个种植沟中 4 行, 长度为 1 m 区域的小麦, 为了准确评价集雨各处理对因垄膜沟播导致种植面积减少的产量补偿效应, 集雨处理以沟垄总面积计算冬小麦产量, 即面积为 1.2 m^2 (行长 1 m $\times$ 宽 1.2 m), 每小区取 3 个重复。

土壤水分测定:在冬小麦播前(2012-09-16, 2013-09-15)、苗期(2012-10-13, 2013-10-11)、返青期(2013-03-27, 2014-03-24)、拔节期(2013-04-22, 2013-04-26)、抽穗期(2013-05-18, 2013-05-23)、灌浆期(2013-06-13, 2014-06-18)、收获期(2013-07-03, 2014-07-05)分别测定 0~200 cm 土层土壤水分,每 20 cm 取样,采用烘干法在 105℃烘干后称重,测定各土层土壤含水量,平作处理取样点位于小麦行间,集雨处理在种植沟内沿垄侧和沟内正中点分别取样,取平均值,田间取样重复 3 次,土壤容重采用环刀法,每 20 cm 取样,测定各土层土壤容重,并按以下公式计算土壤贮水量。

土壤贮水量: $W = \sum_{i=1}^{10} H_i \times A_i \times B_i \times 10/100$

式中, W 为土壤贮水量(mm); H_i 为土层深度(cm); A_i 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); B_i 为土壤含水量(%)。

土壤耗水量: $ET_a = W_1 - W_2 + p$

式中, ET_a 为土壤耗水量(mm); W_1 为播前土壤贮水量(mm); W_2 为收获后土壤贮水量(mm); p 为生育期有效降水量(mm),式中土壤贮水量及耗水量均以 2 m 土层含水量计算。

水分利用效率: $WUE = Y/ET_a$

式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y 为沟垄总面积计算的籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

肥料农学效率: $AE = (Y_1 - Y_2)/m$

式中, AE 为肥料农学效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Y_1 为施肥区作物产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_2 为不施肥区作物产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); m 为纯养分投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),本文所用的养分投入量为投入 N 和 P_2O_5 用量之和。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 Dps 6.55 处理软件进行数据处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对冬小麦不同生育阶段 0~200 cm 土层土壤贮水状况的影响

在冬小麦主要生育阶段测定了不同处理 0~200 cm 土层的土壤贮水量,冬小麦整个生育期内,0~200 cm 土壤贮水量总体呈逐渐减少的趋势,因两年降雨年型不同(见表 1),2013 年在灌浆期、2014 年在拔节期土壤贮水量有所增加。

从表 2 可以看出,在同一施肥水平下,从苗期到拔节期测定的 0~200 cm 土壤贮水量集雨处理较平作处理高,2012—2013 年度返青期测定的土壤贮水

量集雨处理较对应平作处理增加量最大,达 15.54~37.93 mm,其中 RM 处理高出 BM 处理 37.93 mm ($P < 0.05$),差异最大;2013—2014 年度土壤贮水量差异最大的时期出现在拔节期,集雨处理较平作高 20.00~25.37 mm ($P < 0.05$)。进入抽穗期,集雨处理较平作处理差异不显著,原因是集雨处理作物吸收土壤水分多,耗水量大,缩小了与平作的差异。灌浆期测定的土壤贮水量集雨较平作差异增加,2013—2014 年度集雨较平作高 12.40~16.56 mm,差异不显著,2012—2013 年度平作处理显著高于集雨 ($P < 0.05$),其中 BH 处理高出 RH 处理 43.23 mm,差异最大,2012—2013 年度差异大于 2013—2014 年度,原因是在 2012—2013 年度降雨量主要集中在灌浆期,从抽穗(2013-05-18)到灌浆(2013-06-13)期间有 90.4 mm 的降雨量。收获期测定的土壤贮水量集雨处理与对应平作处理差距达到最大,2012—2013 年度 RH、RM、RM 和 R0 较对应平作处理分别减少 45.06、36.69、38.13 mm 和 25.63 mm,均达到显著水平 ($P < 0.05$);2013—2014 年度集雨较平作差异小于 2012—2013 年度,RH、RM、RM 和 R0 土壤贮水量较对应平作处理分别减少 4.37、8.68、15.80 mm ($P < 0.05$)和 15.40 mm。

在集雨种植方式下,从苗期到返青期测定的各施肥处理 0~200 cm 土壤贮水量无明显差异,进入拔节期各施肥处理差异逐渐变大,拔节期测定的土壤贮水量各处理高低顺序为: RH > RM > RL > R0。2012—2013 年度 RH、RM 和 RL 较 R0 土壤贮水量分别高 27.23 ($P < 0.05$)、16.78 mm ($P < 0.05$)和 2.67 mm, RH 较 RM 高 10.45 mm ($P < 0.05$);2013—2014 年度 RH、RM 和 RL 较 R0 土壤贮水量分别高 18.01 ($P < 0.05$)、14.66 mm ($P < 0.05$)和 6.01 mm。从抽穗期到收获期测定的土壤贮水量集雨各处理高低顺序为: R0 > RL > RM > RH,抽穗期测定的土壤贮水量 RH 较 RL 和 R0 低 16.23~24.82 mm,差异显著 ($P < 0.05$),RH 与 RM 差异不显著。2012—2013 年度灌浆期测定的土壤贮水量 RH 与其他处理差异显著 ($P < 0.05$),RH 处理较 RM、RL 和 R0 处理分别低 40.51、46.73 mm 和 56.62 mm;2013—2014 年度灌浆期测定的土壤贮水量 RH、RM 和 RL 较 R0 分别低 30.89、29.17 mm 和 26.78 mm,差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。收获期测定的土壤贮水量 RH 较 RL 和 R0 低 13.00~33.31 mm,差异显著 ($P < 0.05$),RH 与 RM 差异不显著。平作各施肥处理规律与集雨种植处理相似,2012—2013 年度拔节和抽穗期测

定的土壤贮水量平作各施肥处理的差异大于集雨各施肥处理,但在灌浆期和收获期测定的土壤贮水量平作各施肥处理的差异小于集雨各施肥处理;2013—2014 年度拔节期测定的土壤贮水量平作各施肥处理的差异小于集雨各施肥处理,但后期测定的

土壤贮水量平作各施肥处理的差异大于集雨各施肥处理。年际之间规律的差异可能是由于 2012—2013 年降雨量主要集中在抽穗到灌浆期,2013—2014 年降雨量主要集中在拔节期。

表 2 不同施肥处理冬小麦各生育阶段 0~200 cm 土壤贮水量(mm)

Table 2 Soil water storage in 0~200 cm soil layer of different fertilizer application levels treatment at different growth stages								
年份 Years	处理 Treatments	播前 Sowing	苗期 Seedling	返青 Returning green	拔节 Jointing	抽穗 Heading	灌浆 Filling	收获 Maturing
2012—2013	RH	488.64a	544.50a	441.82a	417.11a	367.70b	343.35c	328.56c
	RM	488.64a	548.06a	439.53a	406.66a	377.68b	383.87ab	336.86ab
	RL	488.64a	531.14a	449.30a	392.55ab	383.93ab	390.09ab	343.30ab
	R0	488.64a	529.70a	441.45a	389.87b	387.66a	399.98a	361.87a
	BH	488.64a	512.47a	421.62a	407.48a	363.58c	386.58b	373.62a
	BM	488.64a	513.25a	401.60b	389.92ab	364.72c	402.27ab	373.55a
	BL	488.64a	503.61a	419.49a	384.44ab	390.15ab	417.34a	381.43a
	B0	488.64a	514.16a	406.96ab	378.68b	396.57a	411.23a	387.51a
2013—2014	RH	497.56a	529.09a	461.22a	479.44a	328.48b	286.46b	269.79b
	RM	497.56a	521.14a	453.40a	476.09ab	332.86ab	288.18b	275.96ab
	RL	497.56a	525.39a	453.28a	467.44ab	345.85a	290.56b	282.79a
	R0	497.56a	507.36b	454.90a	461.43c	353.30a	317.34a	286.68a
	BH	497.56a	515.68a	434.71a	454.06a	320.00b	269.89b	274.16b
	BM	497.56a	512.47a	434.22a	448.09ab	331.37b	273.73b	284.65ab
	BL	497.56a	499.91ab	432.70a	443.69ab	338.43ab	278.16ab	298.59a
	B0	497.56a	496.25ab	432.29a	441.43b	350.46a	304.23a	302.08a

注:同列数据后不同小写字母表示同一种种植模式下不同施肥处理间差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters indicate significant differences ($P<0.05$) under the same planting mode in same line. The same below.

2.2 集雨施肥对冬小麦产量、肥料农学效率及水分利用率的影响

2.2.1 集雨施肥对冬小麦产量的影响 由表 3 可知,同一施肥水平下,集雨种植方式冬小麦产量高于传统平作。2012—2013 年度,集雨施肥处理平均产量为 6 146.0 kg·hm⁻²,比平作处理提高 12.44%,在高、中、低、无 4 种施肥水平下,集雨处理分别比平作处理产量增产 14.69% ($P<0.05$)、15.71% ($P<0.05$)、11.54% ($P<0.05$)和 7.02%;2013—2014 年度,集雨施肥处理平均产量为 6 242.9 kg·hm⁻²,比平作处理增产 8.70%,在高、中、低、无 4 种施肥水平下,集雨处理分别比平作处理产量增产 9.89% ($P<0.05$)、10.17% ($P<0.05$)、8.41% ($P<0.05$)和 5.86%,其中 RM 的增产效果最显著,其次为 RH。

同一种植方式下,随着施肥量的增加冬小麦产量均呈增加趋势。集雨种植方式下,除 RH 与 RM 之间差异不显著,其余处理间差异均达到显著水平 ($P<0.05$),2012—2013 年度,RL 较 R0 增产 10.70%

($P<0.05$),RM 较 RL 增产 10.59% ($P<0.05$),RH 较 RM 差异不显著;2013—2014 年度,RL 较 R0 增产 10.28% ($P<0.05$),RM 较 RL 增产 9.73% ($P<0.05$),RH 较 RM 增产 4.68%,且差异不显著。平作各施肥处理冬小麦产量规律与集雨相似,各处理间差异幅度略小于集雨处理。

2.2.2 集雨施肥对冬小麦水分利用效率的影响 结果表明(表 3),同一施肥水平下,集雨种植方式冬小麦水分利用效率大于传统平作。2012—2013 年度,集雨施肥处理平均水分利用效率为 15.74 kg·mm⁻¹·hm⁻²,比平作处理提高 1.83%,其中 RM 较 BM 提高 4.98% ($P<0.05$);2013—2014 年度,集雨施肥处理平均水分利用效率为 14.96 kg·mm⁻¹·hm⁻²,比平作处理提高 5.83%,在高、中、低、无 4 种施肥水平下,集雨处理分别比对应的平作处理水分利用效率提高 8.76% ($P<0.05$)、7.89% ($P<0.05$)、4.26% 和 1.87%,其中 RH 和 RM 提高效果最显著。

表 3 种植方式及施肥水平对冬小麦产量、肥料农学效率及水分利用率的影响

Table 3 Effects of planting pattern and fertilizer application on grain yield, fertilizer agronomic efficiency(AE) and WUE of winter wheat

年份 Years	处理 Treatments	经济产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE/(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	肥料农学效率 AE/(kg·kg ⁻¹)
2012—2013	RH	6779.8a	16.79a	3.19c
	RM	6543.4a	16.54a	4.00a
	RL	5916.4b	15.21bc	3.81ab
	R0	5344.3c	14.43c	—
	BH	5911.0a	16.23a	2.04b
	BM	5654.9ab	15.73ab	2.20a
	BL	5304.0bc	14.57bc	2.07ab
	B0	4993.9c	13.33c	—
2013—2014	RH	6907.1a	16.47a	3.23b
	RM	6598.3a	15.76ab	3.82a
	RL	6013.4b	15.11b	3.74a
	R0	5452.8c	14.48c	—
	BH	6285.4a	14.91a	2.52b
	BM	5989.1ab	14.57ab	2.79a
	BL	5546.9bc	13.97bc	2.64ab
	B0	5151.0c	13.09c	—

同一种植方式下,各施肥处理水分利用效率与产量规律基本一致,大小顺序为 RH>RM>RL>R0,BH>BM>BL>B0。集雨种植方式下,2012—2013 年度,RL 较 R0 提高 5.42%,RM 较 RL 提高 8.80% ($P<0.05$),RH 较 RM 提高 1.48% ($P>0.05$);2013—2014 年度,RL 较 R0 提高 9.24% ($P<0.05$),RM 较 RL 提高 7.94% ($P<0.05$),RH 较 RM 提高 3.16% ($P>0.05$);平作各施肥处理冬小麦水分利用效率规律与集雨相似,各处理间差异幅度小于集雨处理。

2.2.3 集雨施肥对冬小麦肥料农学效率的影响
肥料农学效率是衡量肥料利用率的重要指标,从表 3 可以看出:同一施肥水平下,集雨种植方式冬小麦肥料农学效率显著大于传统平作 ($P<0.05$)。2012—2013 年度,集雨施肥处理平均肥料农学效率为 3.67 kg·kg⁻¹,比平作处理提高了 74.36%,在高、中、低 3 种施肥水平下,集雨处理分别比平作处理肥料农学效率提高了 56.51%、81.36% 和 84.46%;2013—2014 年度,集雨施肥处理平均肥料农学效率为 3.60 kg·kg⁻¹,比平作处理提高了 35.62%,在高、中、低 3 种施肥水平下,集雨处理分别比平作处理肥料农学效率提高了 28.20%、36.68% 和 41.60%。

同一种植方式下,各施肥处理肥料农学效率大小规律为 RM>RL>RH;BM>BL>BH。集雨种植方式下,2012—2013 年度,RM 较 RH 提高了 25.30% ($P<0.05$),RL 较 RH 提高了 19.54% ($P<0.05$);

2013—2014 年度 RM 较 RH 提高了 18.15% ($P<0.05$),RL 较 RH 提高了 15.64% ($P<0.05$),两年 RM 与 RL 差异均不显著。平作种植方式下,2012—2013 年度,BM 较 BH 提高了 8.10% ($P<0.05$);2013—2014 年度 BM 较 BH 提高了 10.82% ($P<0.05$)。

3 讨 论

相关研究表明,采用沟垄集雨种植能够使无效、微效降雨有效化,增加土壤有效水分供应量,使集于沟中的降雨入渗更深,沟垄覆膜集雨栽培较露地栽培具有聚水保墒作用^[13-15]。本试验苗期到拔节期各集雨处理 0~200 cm 土壤贮水量较对应平作处理高 8.11~37.94 mm,随生育期推进,冬小麦营养和生殖生长达到旺盛期,集雨处理冬小麦生物量大于平作处理,集雨施肥各处理生物产量显著高于对应平作处理,两年增幅都在 10% 以上,集雨处理较平作耗水量增大,使土壤贮水量降低,到小麦收获期集雨处理土壤贮水量小于平作处理。

本试验结果表明,施肥对冬小麦生育期土壤水分有明显影响,苗期和返青期测定的 0~200 cm 土壤贮水量各施肥处理间无明显差异,到小麦拔节期各处理出现显著差异,集雨种植各施肥处理土壤贮水量高低顺序为:RH>RM>RL>R0,从抽穗期到收获期测定的土壤贮水量高低顺序则为:R0>RL>RM>RH;平作各施肥处理土壤贮水量规律与集雨

相似。形成以上结果的原因可能是,越冬前,因麦苗植株小、气温低,耗水强度低,施肥所造成的差异不明显;小麦返青拔节后,气温回升,地面蒸发量增加,由于施肥处理增加了小麦分蘖数及叶面积,因而使麦田保持较高的覆盖度,相对减少了这一时期土壤水分的蒸发损失;冬小麦生育后期,由于施肥促进了小麦营养体的生长,加强了根系吸水能力和植株的蒸腾耗水强度,从而增加了土壤水分的消耗量^[16-17]。这与戴万宏^[18]等研究结果相似,拔节之前,增加施肥量并没有使土壤含水量降低,相反有所升高,小麦拔节之后的情况则相反,增施肥料明显增加了土壤水分的消耗量,使土壤贮水量较对照明显降低。

集雨处理相对较好的水分条件,使冬小麦在生理生长及产量方面均好于对照,在我国干旱半干旱地区,雨水利用效率低下,作物生产潜力由于缺水而下降 60%~75%^[19]。本试验结果表明,集雨种植对冬小麦产量的提高较传统平作有明显作用,产量较平作处理提高了 7.02%~21.9%,Li X Y^[20]等的研究也表明垄膜集雨种植可显著提高作物产量,提高幅度可达 21%~92%。本试验结果表明,施肥的增产效果显著,随着施肥量的增加产量呈增加趋势,但相邻肥力梯度间增幅随施肥量的增加逐渐降低,高施肥虽较中施肥量增产,但增产幅度不显著,说明中施肥量(N+P: 180+120 kg·hm⁻²)可能就是经济的施肥上限量。张福锁^[21]等研究表明如果将氮肥施用量分成 3 级,150~250 kg·hm⁻²为适中,小于 150 kg·hm⁻²为不足,大于 250 kg·hm⁻²为超量,适中肥量(150~250 kg·hm⁻²)增产潜力最大。

任小龙^[22]等研究结果表明沟垄覆盖栽培模式可以有效改善作物的水分状况,增加籽粒产量,提高农田水分利用效率,本试验结果表明,集雨种植对冬小麦水分利用效率的提高均较传统平作有明显作用,水分利用效率提高 0.47%~7.55%。前人研究认为,施肥能促进冬小麦生长发育,根系深扎,增强作物对深层水分的利用,可以显著提高水分利用效率^[18,23],本试验各施肥处理水分利用效率随着施肥量的增加而增加,相邻肥力梯度间增幅随施肥量的增加逐渐降低,高施肥处理虽水分利用效率最高,但与中肥比较提高幅度不显著,这与产量的规律一致。

肥料农学效率反映了单位施肥量增加作物产量的能力^[24],是评价肥料增产效应较为准确的指标^[21],植物对养分的吸收、运转和利用都依赖于土壤水分,土壤的水分状况在很大程度上决定着作物对养分的吸收利用^[25],集雨种植能改善土壤水分状

况,进而促进土壤养分有效性的发挥和利用。试验结果表明,集雨种植模式肥料农学效率较传统平作提高 28.46%~81.36%。本试验无论是集雨处理还是平作处理,中肥的肥料农学效率最大,其次是低肥,高肥最低,可能是由于过量施肥使化肥养分利用率降低所致。

4 结 论

各集雨施肥处理能改善农田土壤的水分状况,在冬小麦生育前期集雨处理可以显著提高 0~200 cm 土层的土壤贮水量,且集雨种植模式下冬小麦生长后期对水分的吸收利用优于传统平作。

施肥对冬小麦生育期土壤水分有明显影响,拔节期所测土壤贮水量随着施肥量的增加呈增加趋势,冬小麦生育后期土壤贮水量随着施肥量的增加而减少。

集雨种植对冬小麦产量、水分利用效率和肥料农学效率的提高均较传统平作有明显作用,集雨种植模式下中量施肥提高效果最为显著。

参 考 文 献:

- [1] 高亚军,李生秀.北方旱区农田水肥效应分析[J].中国工程科学,2002,4(7):74-79.
- [2] 黄占斌,山 仑.论我国旱地农业建设的技术路线与途径[J].干旱地区农业研究,2000,18(2):1-6.
- [3] 信乃谕,王立祥.中国北方旱区农业[M].北京:中国农业出版社,2002:83-84.
- [4] 上官周平,刘文兆,徐宣斌.旱作农田冬小麦水肥耦合增产效应[J].水土保持研究,1999,6(1):104-106.
- [5] 汪德水.旱地农田肥水关系原理与调控技术[M].北京:中国农业科技出版社,1995:195-203.
- [6] 徐学选,穆兴民.小麦水肥产量效应研究进展[J].干旱地区农业研究,1999,17(3):6-12.
- [7] 张德奇,廖允成,贾志宽,等.宁南旱区谷子地膜覆盖的土壤水温效应[J].中国农业科学,2005,38(10):2069-2075.
- [8] 王俊鹏,马 林,蒋 骏,等.宁南半干旱地区谷子微集水种植技术研究[J].水土保持通报,2000,20(3):41-43.
- [9] 段德玉,刘小京,李伟强,等.夏玉米地膜覆盖栽培的生态效应研究[J].干旱地区农业研究,2003,21(4):6-9.
- [10] 温晓霞,韩思明,赵风霞,等.旱作小麦地膜覆盖生态效应研究[J].中国生态农业学报,2003,11(2):93-95.
- [11] 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.
- [12] 薛 澄,王朝辉,李富翠,等.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.
- [13] 赵聚宝,钟兆站,薛军红,等.旱地春玉米田微集水保墒技术研究[J].农业工程学报,1996,12(2):32-37.

2) 不同的化控制剂具有其最有效的作用时间。在本试验中,保水剂的有效作用时间是较持久的,对整个玉米生育期都起到调控作用;而 FA 的作用时间较短,通常只有 20~30 d,且不同生育期的作用效果也不同,仅就光合作用而言,FA 最有效的时间为拔节中后期。

3) 在本试验 SAP 施用浓度 90 kg·hm⁻²,FA400 倍液,0.075 kg·m⁻²条件下,化学调控处理均出现了增产,其中,化学联合调控下,由于最大化提高了光合效率,增产幅度最高,较 CK 增产 21.3%。

参 考 文 献:

[1] 罗志成.北方旱地农业研究的进展与思考[J].干旱地区农业研究,1994,12(1):4-13.

[2] 杨培岭,廖人宽,任树梅,等.化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展[J].农业机械学报,2013,44(6):100-109.

[3] 杨永辉,吴普特,武继承,等.复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J].农业机械学报,2011,42(7):116-123.

[4] 李茂松,李 森,张述义,等.灌浆期喷施新型 FA 抗蒸腾剂对冬小麦的生理调节作用研究[J].中国农业科学,2005,38(4):703-708.

[5] 韩玉国,任树梅,李云开,等.黄腐酸(FA)旱地龙在苹果节水生产中的应用效果研究[J].农业工程学报,2004,20(6):93-97.

[6] 迟永刚,黄占斌,李茂松.保水剂与不同化学材料配合对玉米生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(6):136-140.

[7] 于 健,雷廷武,Shainberg I,等.不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.

[8] 师长海,孔少华,翟红梅,等.喷施抗蒸腾剂对冬小麦旗叶蒸腾效率的影响[J].中国生态农业学报,2011,19(5):1091-1095.

[9] 杜社妮,白岗栓,赵世伟,等.沃特和 PAM 保水剂对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J].农业工程学报,2007,23(8):72-79.

[10] 廖人宽,杨培岭,任树梅,等.PAM 和 SAP 防治库区坡地肥料污染试验[J].农业机械学报,2013,44(7):113-120.

[11] 李少昆.关于光合速率与作物产量关系的讨论(综述)[J].石河子大学学报(自然科学版),1998,(S1):117-126.

[12] 许大全.光合速率、光合效率与作物产量[J].生物学通报,1999,34(8):11-13.

[13] 薛青武,上官周平.旱地作物的光合作用与产量[J].山西农业科学,1990,(11):27-30.

[14] 康绍忠,史文娟,胡笑涛.调亏灌溉对玉米生理指标及水分生产效率的研究[J].农业工程学报,1998,14(4):88-92.

[15] 房全孝,陈雨海.冬小麦节水灌溉的生理生态基础研究进展[J].干旱地区农业研究,2003,21(1):21-26.

[16] Alderfasi A A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001, 46(3):241-251.

[17] Hirasawa T, Hsiao T C. Some characteristics of reduced lead photosynthesis at midday in maize growing in the field[J]. Field Crops Research, 1999, 62:53-62.

[18] 孙 猛,吕德国,刘威生.杏属植物光合作用研究进展[J].果树学报,2009,26(6):878-885.

[19] 郑 洁,胡美君,郭延平.光质对植物光合作用的调控及其机理[J].应用生态学报,2008,19(7):1619-1624.

[20] 许大全. Progress in photosynthesis research: from molecular mechanisms to green revolution[J].植物生理学报,2001,27(2):97-108.

[21] 邱孟柯,回振龙,黄晓鹏,等.黄腐酸对雾培马铃薯幼苗抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):155-161.

(上接第 98 页)

[14] 王彩绒,田霄鸿,李生秀,等.沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J].中国农业科学,2004,37(2):208-214.

[15] 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):45-52.

[16] 姚晓晔,汪德水,程宪国,等.不同施肥水平下旱地冬小麦水分效应研究[J].土壤肥料,1994,(6):15-18.

[17] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000:174-177.

[18] 戴万宏,吕殿青.缕土旱作区施肥对小麦产量和水分利用效率的影响[J].西北农业大学学报,1993,(21):0-93.

[19] 李凤民,徐进章.黄土高原半干旱地区集水型生态农业分析[J].中国生态农业学报,2002,10(1):101-103.

[20] Li X Y, Gong J D, Li F R. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid

conditions[J]. Agricultural Water Management, 2001, 50(3):173-183.

[21] 张福锁,王激清,张 卫,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,4(5):915-924.

[22] Ren X L, Jia Z K, Chen X L. Effect of micro-catchment rainwater harvesting on water and nutrient use efficiency in farmland under different simulated rainfall conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(3):75-81.

[23] 李芳林,郝明德,杨 晓,等.黄土旱塬施肥对土壤水分和冬小麦产量的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):154-157.

[24] 王伟妮,鲁剑巍,李银水,等.当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J].中国农业科学,2010,43(19):3997-4007.

[25] 李世娟,周殿贤,李建民.限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响[J].华北农学报,2001,16(3):86-91.