

宁南旱区沟垄集雨结合补灌对土壤水分利用及冬小麦产量的影响

杨震^{1,2,3},董昭芸^{1,2,3},卫婷^{1,2,3},张鹏^{1,2,3},贾志宽^{1,2,3}

(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. 农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室,陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探明沟垄集雨结合不同时期补灌措施的集雨保墒效果,2013–2015 年在宁南半干旱区设置不同补灌模式(全生育期不灌溉、前期(拔节期)补灌、后期(抽穗期)补灌、前后期均补灌)结合补灌方式(集雨补灌和传统畦灌),研究集雨补灌措施对土壤水分、冬小麦产量及水分利用效率的影响。结果表明:沟垄集雨补灌模式可有效改善 0~200 cm 土层土壤贮水量,尤其对 0~40 cm 土层提高较为明显。在 2013–2014 年(枯水年)灌水量减半的情况下,前期补灌和全生育期不灌溉处理的小麦产量均高于相对应的畦灌处理,分别提高了 2.6%和 6.2%,其余处理和对应的畦灌处理相比无增产效应;在 4 种补灌模式下,集雨补灌处理的水分利用效率、灌溉水利用效率均显著高于对应的畦灌处理,其中前期补灌最为显著,分别提高 8.5%和 105.1%。2014–2015 年(丰水年),除集雨前后期均补灌处理外,前期补灌、后期补灌和全程不灌溉处理的产量均高于对应的畦灌处理,分别提高 4.5%、7.4%($p<0.05$)和 4.9%;在四种补灌模式下,除集雨前后期均补灌和不灌溉处理的水分利用效率与对应的畦灌处理相差不大外,其余各补灌处理的水分利用效率和灌溉水利用效率均显著高于相对应的畦灌处理,最大增幅分别为 3.8%和 114.7%。可见,沟垄集雨结合适量补灌措施可显著提高冬小麦产量和水分利用效率。

关键词:沟垄集雨;补灌;冬小麦;土壤水分;水分利用效率;产量;宁南半干旱区

中图分类号:S318;S512.1⁺1 **文献标志码:**A

Effects of ridge and furrow rainwater harvesting cultivation with supplemental irrigation on water use and winter wheat yield in arid area of southern Ningxia

YANG Zhen^{1,2,3}, DONG Zhao-yun^{1,2,3}, WEI Ting^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2,3}, JIA Zhi-kuan^{1,2,3}

(1. The Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China;
2. Key Laboratory of Crop Production and Ecology, Minister of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China;
3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the effects of ridge and furrow rainwater harvesting (RFRH) cultivation with supplemental irrigation at different stages on rainwater-collection and soil moisture conservation. A two-year field experiment was conducted in semi-arid area of southern Ningxia from 2013 to 2015. Four supplemental irrigation modes were set up: zero-supplemental-irrigation in growth stages, supplemental irrigation at earlier (jointing) stage, supplemental irrigation at later (heading) stage, supplemental irrigation at earlier (jointing) and later (heading) stages and each irrigation mode has two cultivation patterns: RFRH cultivation with supplemental irrigation (R) and border irrigation (B), aiming to explore the effects of R system on soil moisture, winter wheat yield and water use efficiency (WUE). The results showed that R system can effectively improve the soil water storages in 0~200 cm soil layer, especially in 0~40 cm soil layer. Under the condition of irrigation amount reduction by 50%, yield of the RFRH with supplemental irrigation at earlier stage treatment (R2) and RFRH with zero-irrigation in growth stages treatment (R0) increased by 2.6% and 6.2% compared with corre-

sponding B treatments in 2013–2014 (dry year), there were no significant differences between the RFRH with supplemental irrigation at earlier and later stages treatment (R1), RFRH with supplemental irrigation at later stage treatment (R3) and corresponding B treatments; WUE and IWUE of R treatments were significantly higher than corresponding B treatments under four irrigation modes, the effect of R2 treatment was obvious, increased by 8.5% and 105.1%, respectively; Except for R1 treatment, yield of R2, R3 and R0 treatments increased by 4.5%, 7.4% ($p<0.05$) and 4.9%, respectively, compared with corresponding B treatments in 2014–2015 (wet year); Except for no obvious difference of WUE between R1, R0 treatments and corresponding B treatments, WUE and IWUE of other R treatments were significantly higher than corresponding B treatments under four irrigation modes, increased by up to 3.8% and 114.7%, respectively. Therefore, the ridge and furrow rainwater harvesting cultivation with supplemental irrigation could significantly increase grain yield, WUE of winter wheat.

Key words: the ridge and furrow rainwater harvesting cultivation; supplemental irrigation; winter wheat; soil moisture; water use efficiency; yield; semi-arid area of southern Ningxia

近年来,随着全球干旱问题日趋严重,水资源短缺已成为旱作农业生产所面临的最为严重问题^[1]。我国是水资源极为短缺的国家,水资源危机是制约农业和经济发展的重要因素^[2-4]。特别是在干旱半干旱地区气候偏暖,降水量有明显减少的趋势,且每年有 60% 的降雨都聚集在 7~9 月份,正好为作物需水较少的时期,降雨类型主要为小雨或暴雨,降雨年际间及季节间变率均较大,使得水资源短缺的问题更加突出^[5]。加之,农田灌溉水利用效率低下,尤其农业灌溉用水浪费严重,使得农业用水短缺的问题进一步加剧^[6-7]。如何通过提高降雨利用率以减少灌溉用水量是干旱半干旱区实现节水农业的重要途径。

多年的研究表明,旱作农田沟垄集雨种植技术通过田间起垄覆膜、沟内集雨种植可使无效降水叠加为有效降水,种植沟内降雨得以富集,同时因垄面覆膜显著降低了土壤水分蒸发面积,种植沟中的土壤水分条件得以显著改善,进而有效地促进作物生长,提高作物的生产力^[8-11]。沟垄集雨具有良好的蓄水保墒作用,可以提高作物生育期的土壤贮水量,进而提高作物叶绿素含量、光合能力及籽粒产量等^[8]。沟垄集雨结合农作物需水关键期进行有限补灌,能大幅提高作物的产量、灌溉利用率和水分利用效率^[12-14],从而减少灌溉用水,是节水农业发展的有效技术途径^[8-9,13-14]。

已有诸多研究关注于旱作农田垄膜沟种植培

方式对作物生长发育的影响^[12-14],而将农田沟垄集水种植技术与限量补灌相结合的研究却鲜有报道。本研究正是基于这一基本设想,以传统畦灌为对照,分析不同时期补灌对半干旱区土壤水分及作物生长的影响,为旱作技术应用于灌溉农田实现节水灌溉奠定实践基础。

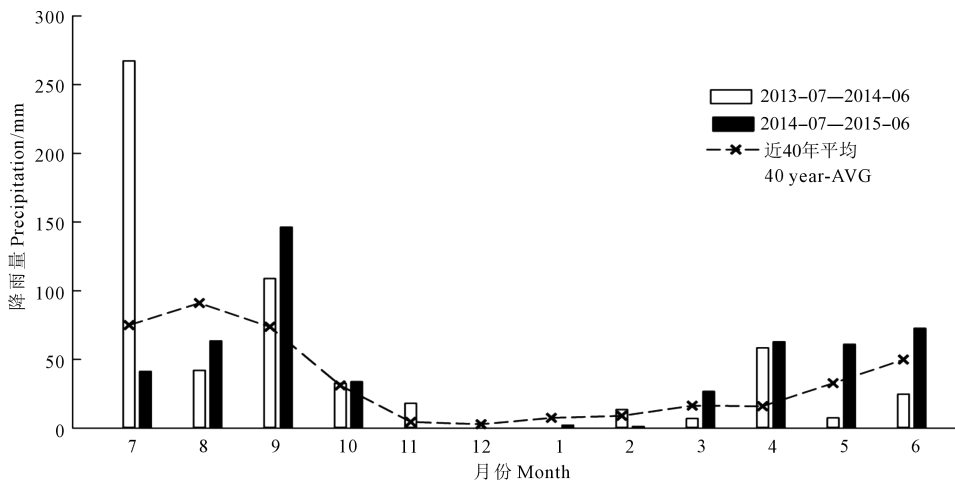
1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013–2015 年在宁夏回族自治区彭阳县长城村旱地农业试验区 (106°48'E, 35°51'N) 进行,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℃,年平均日照时数 2 518.2 h,年蒸发量 1 753.2 mm,无霜期 140~160 d。2013–2015 年冬小麦生育期各月的降水量和近 40 年月平均值见图 1。以多年冬小麦生育期平均降水量为标准参数划分降水年型。试验区冬小麦生育期多年平均降雨量为 244.1 mm。2013–2014 年冬小麦全生育期的总降水量为 197.9 mm,为同期 40 年平均降水量的 81.1%,属于枯水年。在 2014–2015 年冬小麦全生育期的降水量为 311.5 mm,为同期 40 年平均降水量的 127.6%,属于丰水年。试验田为旱平地,土壤类型为黄绵土。不同土层土壤基础养分见表 1。

表 1 0~60 cm 土层土壤养分状况
Table 1 Nutrient contents at 0~60 cm soil layer

土层/cm Soil layer	有机碳/(g·kg ⁻¹) Organic carbon	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen
0~20	15.1	63.6	37.6	161.2	1.2
20~40	13.9	44.9	7.9	117.2	0.9
40~60	13.2	46.8	6.0	102.7	1.1



数据来源:宁夏省彭阳县气象站。
Source: Meteorological Observation Station of Pengyang County, Ningxia Province, China.

图 1 2013-2015 年冬小麦生育期降水量

Fig.1 Distribution of monthly precipitationat the experimental site during 2013-2015

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设置 4 种灌溉模式:全生育期不灌溉、拔节期灌溉、抽穗期灌溉、拔节期抽穗期均灌溉,每种灌溉模式下有沟垄集雨种植(R)和平作畦灌(B)两种田间耕种管理方式,共 8 个处理(见表 2),每处理 3 次重复。平作畦灌灌水定额参考当地灌溉农田传统灌溉量确定,为 750 m³ · hm⁻²;沟垄集雨耕作方式下,考虑到灌溉仅在种植沟中进行,灌水定额设定为畦灌的 50%,灌水定额为 375 m³ · hm⁻²。各处理种植小区面积为 78 m² (长 13 m×宽 6 m)。

沟垄集雨补灌处理垄、沟宽度均为 60 cm,垄高 15 cm,沟内种植和灌溉。沟垄集雨补灌与畦灌的种植密度一致。小麦播前 10 d 整地、起垄、覆膜、施肥深翻,施肥量为 N 180 kg · hm⁻² 和 P₂O₅ 120 kg · hm⁻²,在作物生长期不追肥。分别于 2013 年 9 月 16 日播种,2014 年 7 月 5 日收获,2014 年 9 月 21 日播种,2015 年 7 月 9 日收获。供试品种为陇鉴 301,播量为 190 kg · hm⁻²,播种方式为条播,集雨处理种植沟内条播 4 行小麦,集雨补灌和平作畦灌各处理行距均为 20 cm。

表 2 集雨补灌试验处理

Table 2 Experimental treatments of the ridge and furrow rainwater harvesting cultivation

灌溉模式 Irrigation mode	补灌方式 Irrigation schedule	灌溉定额/mm Irrigation quota
全生育期不灌溉 Zero-irrigation in growth stages	沟垄集雨种植(R0)	0
	Ridge and furrow rainfall harvesting planting(R0)	
	传统裸地平作(B0)	
前期一次灌溉 Supplemental irrigation at earlier stage	传统畦灌(B0)	0
	Traditional tillage planting(B0)	
	集雨补灌(R2)	
后期一次灌溉 Supplemental irrigation at later stage	Ridge and furrow rainwater harvesting cultivation with supplemental irrigation(R2)	37.5
	传统畦灌(B2)	
	Border irrigation(B2)	
前、后期各一次灌溉 Supplemental irrigation at earlier and later stages	集雨补灌(R3)	37.5
	Ridge and furrow rainwater harvesting cultivation with supplemental irrigation(R3)	
	传统畦灌(B3)	
	Border irrigation(B3)	75
	集雨补灌(R1)	
	Ridge and furrow rainwater harvesting cultivation with supplemental irrigation(R1)	
	传统畦灌(B1)	75
	Border irrigation(B1)	
		150

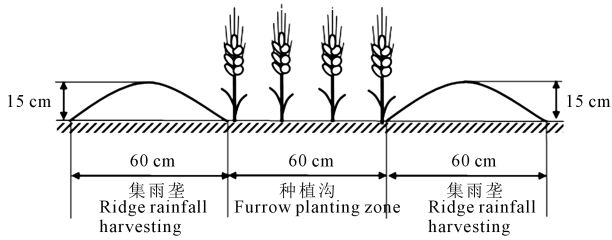


图 2 田间种植示意图

Fig.2 Schematic diagram of the field layout

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率 在冬小麦播前和各个生育时期,分别采用烘干法测定 0~200 cm 土层土壤水分,0~20 cm 每 10 cm 取 1 个土样,20 cm 以下每 20 cm 取 1 个土样,平作畦灌处理取样点位于小麦行间,集雨补灌处理在种植沟内沿垄侧和沟内正中点分别取样,取平均值,田间取样每处理重复 3 次。

1.3.2 冬小麦产量的测定 平作畦灌各处理小麦收获后每小区取长势有代表性的相邻 5 行,长度 1 m 区域的小麦,取样面积为 1 m² (行长 1 m×宽 1 m),重复 3 次。集雨补灌各处理每小区取种植沟中 4 行,长度为 1 m 区域的小麦,为准确评价集雨补灌各处理因垄膜沟播导致种植面积减少的产量效应,集雨补灌各处理以沟垄总面积计算冬小麦产量,3 次重复。

1.3.3 土壤贮水量计算

$$w = \sum_i^n h_i \times \rho_i \times b_i \times 10/100$$

式中, w 为土壤贮水量 (mm); h_i 为土层深度 (cm); ρ_i 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); b_i 为土壤水分重量百分数; n 为土层序号, $i = 10, 20, 40, \dots, 200$ 。

1.3.4 作物耗水量 全生育期耗水量:

$$ET(\text{mm}) = (W_1 - W_2) + P + I + C - D - R$$

式中, W_1 为播前土壤 0~200 cm 土层土壤贮水量 (mm), W_2 为收获后 0~200 cm 土层土壤贮水量 (mm), P 为生育期有效降水量 (mm), I 为生育期灌溉总量 (mm), 对不灌水处理 (R_0 和 B_0) $I = 0$, C (mm) 为地下水流入根部水量, D (mm) 为根部以外排出水量, R (mm) 为地表径流, 在本试验中, 地下水位在地表约 80 m 的深度, 所以地下水流入根部的水量可以忽略不计, 因为本试验地是平地, 所以未发生径流, 而对于 200 cm 以下排水量则不影响本试验计算, 也可以忽略不计。

1.3.5 作物水分利用效率

$$WUE(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}) = Y/ET$$

式中, Y 为作物籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为全生育

期耗水量 (mm)。

1.3.6 作物灌水利用效率

$$IWUE(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}) = Y/I$$

式中, Y 为作物籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); I 为生育期灌溉总量 (mm)。

1.4 数据处理

试验数据用 Dps 6.55 软件进行处理和分析, 采用 SigmaPlot 10.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 沟垄集雨补灌措施下 0~200 cm 土层土壤水分时间动态变化

由于不同年份降雨量及其分布不同, 各处理不同时期的土壤贮水量表现不同 (图 3)。在冬小麦整个生育期内, 0~200 cm 土层土壤贮水量总体呈逐渐减少的趋势。由图 3 可以看出, 无论在枯水年 (2013~2014 年) 还是丰水年 (2014~2015 年) 全生育期内测定的 0~200 cm 土层的土壤贮水量规律基本一致。在不同种植方式下, 两个试验期内集雨补灌处理 0~40 cm 土层的土壤贮水量均高于对应的畦灌处理 (图 4)。而两个试验期内测定的 0~200 cm 土层土壤贮水量, 集雨补灌处理与对应畦灌处理之间的差异在不同生育时期表现不同。

小麦播种到苗期, 冬小麦植株较小, 两个试验期在该阶段降雨量分别为 52.6 mm 和 84.7 mm, 且覆膜可减少土壤无效蒸发, 苗期各集雨补灌处理较对应畦灌处理的增幅分别为 1.8%~3.0% 和 2.8%~3.8% ($p < 0.05$); 试验期间苗期到返青期降雨量分别为 47.6 mm 和 22.6 mm, 在返青期测得的各集雨补灌处理较对应畦灌处理的增幅分别为 2.9%~3.5% 和 4.0%~4.9% ($p < 0.05$)。

进入拔节期后, 冬小麦快速生长, 干物质积累量较大, 各集雨补灌处理耗水量相应高于对应的畦灌处理, 使得集雨补灌与对应畦灌处理之间差异变小, 两个试验期的平均增幅分别为 2.2% 和 4.1%; 由于在拔节期进行了第一次补灌, 集雨处理的补灌量是对应畦灌处理的一半, 且枯水年从拔节到抽穗期降雨量较少, 因此在抽穗期补灌处理 R1、R2 的土壤贮水量低于对应的畦灌处理 B1、B2, 减幅分别为 4.1% ($p < 0.05$) 和 2.8%, 而丰水年该时期有 57.8 mm 的降雨, 因此在抽穗期补灌处理 R1、R2 较对应的畦灌处理 B1、B2 的增幅分别为 4.1% ($p < 0.05$) 和 3.0%, 未进行补灌的 R3、R0 处理的土壤贮水量高于 B3、B0 处理, 增幅分别为 5.0% ($p < 0.05$) 和 4.0% ($p < 0.05$); 随着在生育后期第二次补灌, 促进冬小麦生

育后期生殖生长,耗水量继续增加,使得两试验期内集雨补灌处理和畦灌处理的土壤贮水量差异不断变大,在收获期差异达到最大,在枯水年集雨补灌处理 R1、R2、R3 和 R0 较对应畦灌处理的减幅分

别为 5.3% ($p<0.05$)、5.9% ($p<0.05$)、6.0% ($p<0.05$) 和 6.5% ($p<0.05$),丰水年减幅分别为 9.6% ($p<0.05$)、6.9% ($p<0.05$)、9.3% ($p<0.05$) 和 2.7%。

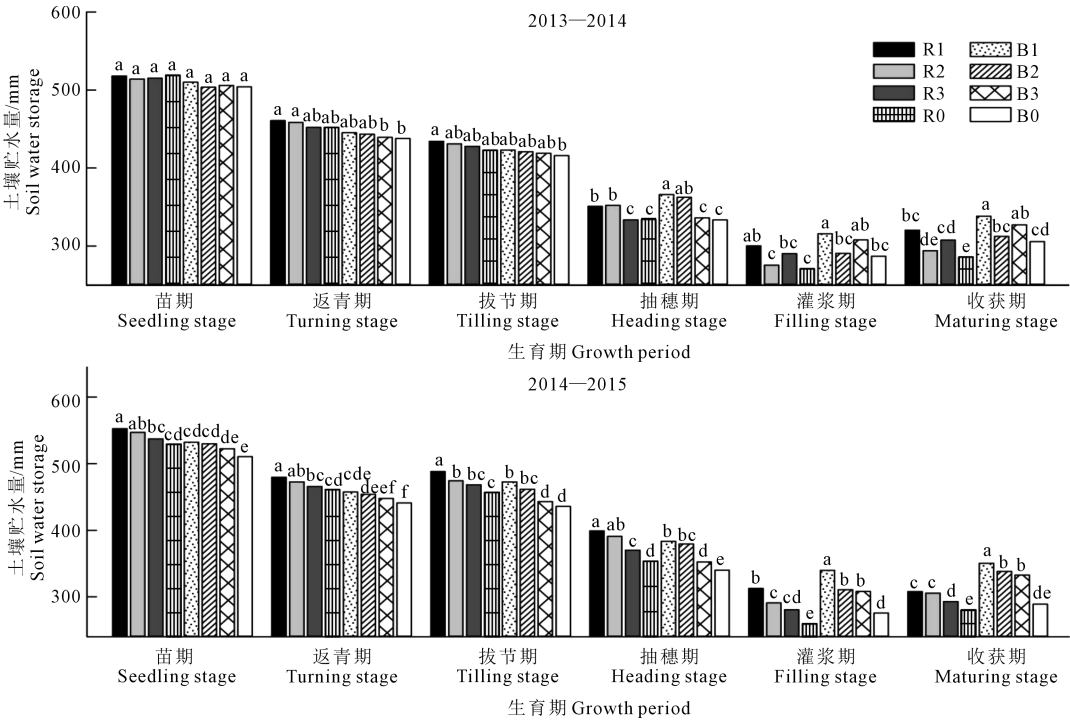
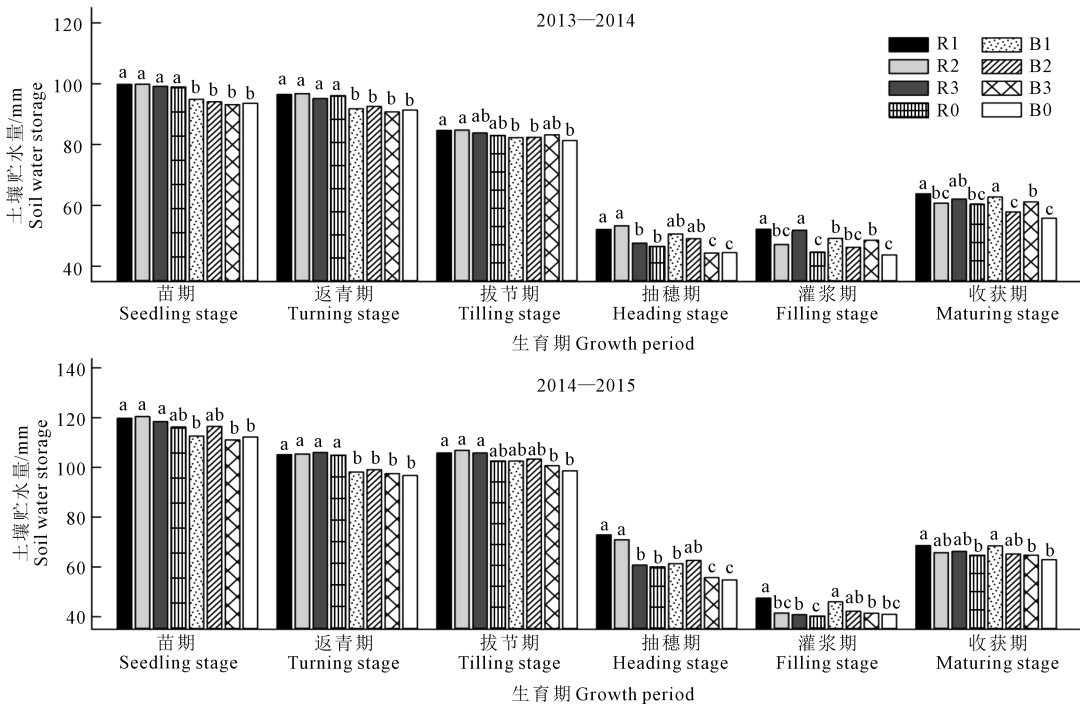


图 3 冬小麦生长期不同处理 0~200 cm 土层土壤贮水量

Fig.3 Soil water storage in 0~200 cm soil depth during winter wheat growth period in different treatments



注:不同字母表示同一生育期不同补灌处理间差异显著($p<0.05$),下同。
Note: Different letters indicate significant differences ($p<0.05$) under the same growth period in different treatments. The same as below.

图 4 冬小麦生长期不同处理 0~40 cm 土层土壤贮水量

Fig.4 Soil water storage in 0~40 cm soil depth during winter wheat growth period in different treatments

2.2 沟垄集雨补灌对冬小麦产量、水分利用效率及灌溉水利用效率的影响

2.2.1 对冬小麦产量的影响 不同处理冬小麦经济产量存在差异(表 3),在不同种植方式下测定的冬小麦产量,除 R1 处理和枯水年 R3 处理较相应的畦灌处理无增产效应之外,其余各集雨补灌处理均较相对应的畦灌处理产量有所提高。在 2013–2014 年,集雨补灌处理 R2、R0 分别较对应的 B2、B0 处理增产 2.6% 和 6.2%;2014–2015 年,集雨补灌处理 R2、R3 和 R0 分别较对应的 B2、B3 和 B0 处理增产 4.5%、5.7%、6.7%。在集雨种植方式下,R2 处理两个试验期的经济产量均高于 R3 处理。在两个试验期内,R2 较 R3 分别增产 9.7% ($p<0.05$) 和 6.0%。畦灌各处理与集雨补灌处理的规律类似。2014–2015 年(丰水)同一处理各集雨补灌处理的经济产量均高于 2013–2014 年(枯水年),增幅分别为 7.6%、7.1%、10.8% 和 4.5%,其中枯水年(2013–2014 年)补灌处理 R0 较对应的 B0 处理的增产幅度高于丰水年(2014–2015 年)。

2.2.2 对水分利用效率的影响 研究期间,沟垄集雨补灌的冬小麦水分利用效率高于畦灌(表 3)。各处理 2014–2015 年(丰水年)的水分利用效率均显著低于 2013–2014 年(枯水年)。各集雨补灌处理(R1、R2、R3 和 R0)丰水年较枯水年的减幅分别为 11.8%、7.1%、10.5% 和 12.4%。在枯水年(2013–2014 年)各集雨补灌处理较对应畦灌处理的增幅高于丰水年(2014–2015 年)的增幅。在 2013–2014 年,不同补灌处理 R1、R2、R3 和 R0 分别较对应的 B1、B2、B3 和 B0 处理显著增加 7.7% ($p<0.05$)、8.6% ($p<0.05$)、3.0% ($p<0.05$) 和 4.8% ($p<0.05$);2014–2015 年,除 R1 与对应的畦灌处理 B1 之间差异不显著外,R2、R3 和 R0 处理分别比对应的 B2、B3 和 B0 处理增加 3.9% ($p<0.05$)、1.8% 和 2.4%。在集雨种植方式下,R2 处理两试验期的水分利用效率均显著高于 R3 处理。两个试验期内,R2 较 R3 分别增加了 5.5% ($p<0.05$) 和 9.4% ($p<0.05$)。畦灌处理与集雨补灌处理的规律类似。

2.2.3 对灌溉水利用效率的影响 在不同种植方式之间,沟垄集雨补灌的灌溉水利用效率显著高于畦灌(表 3)。在 2013–2014 年,不同集雨补灌处理 R1、R2 和 R3 分别较对应的 B1、B2 和 B3 处理提高 90.1% ($p<0.05$)、105.1% ($p<0.05$) 和 93.6% ($p<0.05$);2014–2015 年,不同集雨补灌处理 R1、R2 和 R3 分别较对应的 B1、B2 和 B3 处理显著提高 95.0% ($p<0.05$)、109.0% ($p<0.05$) 和 111.4% ($p<0.05$)。

在集雨种植方式下,R2、R3 处理的灌溉水利用效率为 $R2>R3$,两个试验期间,补灌处理 R2 较 R3 的增幅分别为 9.7% ($p<0.05$) 和 6.0%。在冬小麦生育前期进行补灌更有利于其对灌溉水的充分利用。畦灌处理与集雨补灌处理的规律类似。

表 3 不同处理的冬小麦产量、水分利用效率及灌溉水利用效率

Table 3 Grain yield, WUE and IWUE of winter wheat in different treatments				
年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 /(kg·hm ⁻²) Grain yield	水分利用效率 WUE /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	作物灌水利用效率 IWUE /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
2013— 2014	R1	7068.5ab	15.3a	94.2c
	R2	6753.8bc	15.1a	180.1a
	R3	6157.4e	14.3b	164.2b
	R0	6059.0e	14.5b	—
	B1	7435.7a	14.2b	49.6d
	B2	6585.7cd	13.9c	87.8c
	B3	6359.7de	13.9c	84.8c
2014— 2015	B0	5706.8f	13.8c	—
	R1	7604.1ab	13.5b	101.4b
	R2	7234.3bc	14.0a	192.9a
	R3	6822.2cde	12.8c	181.9a
	R0	6331.5ef	12.7cd	—
	B1	7798.2a	13.5b	52.0c
	B2	6923.6cd	13.5b	92.3b
	B3	6454.9def	12.6cd	86.1b
	B0	5933.2f	12.4d	—

3 讨 论

3.1 沟垄集雨结合补灌对土壤贮水量的影响

沟垄集雨种植可提高土壤贮水量,充分改善冬小麦生长所需的水分环境条件,沟垄覆膜集雨栽培较露地栽培具有聚水保墒作用^[15–19],且在冬小麦生长的需水关键期进行适量补灌可明显增加田间土壤水分和耗水量^[20–23]。王晓凌等研究得出^[16],沟垄覆膜集雨能够增加土壤含水率。秦舒浩等的研究也认为^[17],起垄覆膜能不同程度提高土壤贮水量。本试验结果表明,不论在枯水年型(2013–2014 年)还是丰水年型(2014–2015 年),各集雨补灌处理全生育期内测定的 0~40 cm 土层的土壤贮水量均较畦灌处理高,说明沟垄集雨可充分改善浅层土壤的水分状况。0~200 cm 土层的土壤贮水量与对应的畦灌处理之间存在差异,不同生育时期,表现各不相同。在雨水充足的情况下,沟垄集雨可充分收集降水,提高土壤水分含量;在拔节期,各集雨补灌处理冬小麦生长更为旺盛,该时期集雨补灌处理

的生物量和耗水量均高于对应畦灌处理,但由于沟垄种植方式的集雨效应,各集雨补灌处理的土壤贮水量仍高于畦灌处理;由于在拔节期进行前期补灌的 R1、R2 处理的补灌量是对应畦灌处理的一半,使得在抽穗期,枯水年 R1、R2 处理的土壤贮水量低于对应的畦灌处理,但在丰水年,该时期降雨量充足,各集雨补灌处理的土壤贮水量均高于对应的畦灌处理,体现了沟垄集雨种植方式高效的集水能力;在抽穗期进行了第二次补灌,集雨处理的补灌量仍为对应畦灌处理的一半,且由于集雨补灌处理前期生长旺盛,因此从灌浆到收获期,集雨补灌处理的耗水量高于对应的畦灌处理,再者该阶段正处于降雨较少的月份,使得集雨补灌处理的土壤贮水量均低于对应的畦灌处理。在补灌量减半的情况下,沟垄集雨种植可以将自然降水有效地蓄积到沟中,且垄面覆膜降低了土壤水分蒸发面积^[8-11],从而提高种植区的土壤贮水量,换言之,就是通过高效利用自然降雨的方式来实现灌溉水减半的效应。

3.2 沟垄集雨结合补灌对冬小麦产量的影响

沟垄集雨种植可改善作物根区的水温状况,促进作物的生长和提高籽粒产量,有利于作物获得高产^[24]。Li 等的研究表明^[25],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,在减少 50% 灌溉水的前提下,两个试验期内除 R1 处理以及枯水年的 R3 处理与对应的畦灌处理产量差异不大外,其余各集雨补灌处理的产量均高于对应的畦灌处理。这是由于沟垄集雨种植方式可以通过有效蓄积降水来提高沟内种植区的土壤贮水量,改善冬小麦生长的水分环境,促进其产量的提高^[24-25],这种高效利用降水的方式大大弥补了灌溉水减半对冬小麦产量所造成的影响,以较少的补灌量获得较高的籽粒产量,从而达到了节约灌溉用水的效果。王勇研究表明^[26],不同的灌水时期,以拔节期补灌产量最高,产量增幅最大。本试验结果也发现,两个试验期内集雨补灌处理 R2 和 R3 的经济产量为 R2>R3,且二者之间差异显著,表明在冬小麦生育前期进行补灌更有利于产量的增加。沟垄集雨的种植方式在枯水年增产幅度较为明显,全程不灌水集雨处理(R0)较对应的畦灌处理(B0)在枯水年(2013-2014 年)的增产幅度高于丰水年(2014-2015 年)。

3.3 沟垄集雨结合补灌对冬小麦水分利用效率的影响

在灌水量相同的条件下,灌水分配方式直接影响小麦的产量和水分利用效率^[27]。Ren 等研究表

明^[28],沟垄集雨栽培方式可明显增加作物籽粒产量,提高农田水分利用效率。本试验结果表明,沟垄集雨补灌在保证冬小麦产量的前提下,通过高效利用降水和减少灌溉用水的方式,可明显提高作物的水分利用效率。沟垄集雨补灌处理冬小麦水分利用效率高于对应的畦灌处理,且差异显著。在冬小麦生育前期进行补灌更有助于提高作物的水分利用效率,两个试验期内集雨补灌处理 R2 的水分利用效率均显著高于 R3。在两个不同年型间,各集雨补灌处理丰水年的水分利用效率均显著低于枯水年,究其原因:在丰水年,水分不足已经不是影响小麦生长的最主要因素,且沟垄集雨的集水作用使种植区富集大量水分,加上部分降雨集中在冬小麦生长末期,从而降低了水分利用效率,这与任小龙等研究结果^[15]一致。充足的水分使得小麦营养生长旺盛从而消耗大量的土壤水分,以籽粒产量计算的水分利用效率的提高幅度有限,这与尹洪涛等研究结果^[29]一致。且在枯水年(2013-2014 年)各集雨补灌处理较畦灌处理的增幅高于丰水年(2014-2015 年)。

3.4 沟垄集雨结合补灌对冬小麦灌溉水利用效率的影响

张玉等研究表明^[21],沟垄集雨种植补灌 $375 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 在节约灌溉水 50% 的同时,较平作种植灌溉水利用效率提高了 119.1%,集雨种植补灌 $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理的灌溉水利用效率也显著高于畦灌。王勇研究表明^[26],在拔节期进行少量供水,灌溉水利用效率可提高 2~6 倍。本试验结果表明,由于各沟垄集雨补灌处理的补灌量是对应畦灌处理的一半,但其产量与畦灌处理差异不大,有的甚至高于畦灌处理,使得沟垄集雨补灌处理的灌溉水利用效率均显著高于对应的畦灌处理,说明沟垄集雨可明显提高冬小麦对补灌水的利用效率。两个试验期内集雨补灌处理 R2 的灌溉水利用效率均高于 R3,且达到显著水平,说明在冬小麦生育前期进行补灌更有利于其对灌溉水的充分利用,这与前人的研究相一致^[26]。

4 结 论

与传统畦灌相比较,沟垄集雨补灌可高效利用有限的降雨,明显改善冬小麦生长的水分环境,且在灌溉量减半的前提下,不同补灌处理均可明显提高不同土层的土壤贮水量,在保证冬小麦产量的前提下,水分利用效率和灌溉水利用效率均有明显的提高。相较于后期补灌,在冬小麦生育前期进行适

量补灌效果更佳。沟垄集雨补灌在丰水年可将更多的无效降雨集中到沟中,提高土壤贮水量,促进冬小麦的生长发育,从而提高冬小麦产量,但考虑到其增产幅度和水分利用效率均低于枯水年,因此,沟垄集雨补灌在枯水年的增产效果更为明显。沟垄集雨种植结合适量补灌有良好的增产节水效果,可用于解决灌区水分不足的问题。

参 考 文 献:

[1] Somerville C, Briscoe J. Genetic engineering and water [J]. Science, 2001, 292(5525): 2217.

[2] 戴会超,唐德善,张范平,王冰伟.城市人水和谐度研究[J].水利学报,2013,44(08):973-978.

[3] 杨贵勇,汪林,王浩.基于水土资源状况的中国粮食安全思考[J].农业工程学报,2010,26(12):1-5.

[4] Ramon J, Agnès H. Effects of tillage systems in dryland farming on near-surface water content during the late winter period [J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(2): 173-183.

[5] 肖国举,王静.黄土高原集水农业研究进展[J].生态学报,2003,23(5):1003-1008.

[6] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge/furrow rations and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J].Agricultural Water Management,2002,54(3):243-254.

[7] 雷波,刘钰,许迪.灌区农业灌溉节水潜力估算理论与方法[J].农业工程学报,2011,27(1):10-14.

[8] 张瑞,石玉,张永丽,等.越冬期测墒补灌对冬小麦光合特性和水分利用效率的影响[J].麦类作物学报,2015,5(07):964-970.

[9] 李巧珍,李玉中,郭家选,等.覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(02):25-30.

[10] Li X L, Su D R, Yuan Q H. Ridge-furrow planting of alfalfa (*Medicago sativa* L.) for improved rainwater harvest in rainfed semiarid areas in Northwest China [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(1): 117-125.

[11] Zhang J X, Zheng D W, Li T G, et al. Rainwater harvesting approaches and their effects on increasing soil water content and crop yield in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 26(7): 65-69.

[12] 谷晓博,李援农,周昌明,等.垄沟集雨补灌对冬油菜根系、产量与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):1-13.

[13] 秦舒浩,张俊莲,王蒂,等.半干旱雨养农业区集雨补灌对马铃薯田水分运移的影响[J].水土保持学报,2011,25(4):179-182.

[14] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西半干旱区垄膜沟种方式对春玉米水分利用和产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1917-1928.

[15] 任小龙,贾志宽,陈小莉,等.模拟降雨量下沟垄微型集雨种植玉米的水温效应[J].中国农业科学,2008,41(1):70-77.

[16] 王晓凌,陈明灿,易现峰,等.垄沟覆膜集雨系统垄宽和密度效应对玉米产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(8):40-47.

[17] 秦舒浩,张俊莲,王蒂,等.覆膜与沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响[J].应用生态学报,2011,22(2):389-394.

[18] 韩娟,廖允成,贾志宽,等.半湿润偏旱区沟垄覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].作物学报,2014,40(1):101-109.

[19] Gan Y T, Kadambot H M S, Neil C T, et al. Ridge-furrow mulching systems—An innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments [J]. Advances in Agronomy, 2013, 118:429-457.

[20] 易立攀,于振文,张永丽,等.不同土层测墒补灌对冬小麦耗水特性及产量的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1361-1366.

[21] 张玉,韩清芳,成雪峰,等.关中灌区沟垄集雨种植补灌对冬小麦光合特征、产量及水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2015,26(5):1382-1390.

[22] 韩占江,于振文,王东,等.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].作物学报,2010,36(3):457-465.

[23] 林祥,王东,谷淑波.播种期补灌对土壤含水量和小麦籽粒产量的影响[J].麦类作物学报,2015,35(12):1700-1711.

[24] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2013,116: 101-109.

[25] 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.

[26] 王勇.集雨补灌对旱地冬小麦产量和水分利用的影响[J].水土保持研究,2003,10(1):104-105.

[27] 孟兆江,孙景生,段爱旺,等.调亏灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆特征及其模拟模型[J].农业工程学报,2010,26(1):18-23.

[28] 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.

[29] 尹洪涛,陈国庆.不同降雨模式对夏玉米干物质生产和水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(2):141-143.