

深蓄灌溉对夏玉米农田水分动态的影响

王芳¹, 查晴¹, 赵洁², 庞耀悦¹, 孙骏¹,
马宇欣¹, 陈滇豫¹, 甄晶博¹, 胡笑涛¹

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;2.陕西省水文水资源勘测中心,西安 710068)

摘要: 为探究深蓄灌溉利用汛期雨洪资源补充土壤水和地下水的可行性,于 2020 年 6—10 月在玉米田间小区开展试验研究,监测不同计划储水深度(T1: $H_p=60$ cm;T2: $H_p=90$ cm;T3: $H_p=120$ cm;T4: $H_p=150$ cm;T5: $H_p=180$ cm)且以饱和含水率为灌水上限的一次深蓄灌溉条件下土壤水分动态变化特征,研究量化补充土壤水的农田水分动态,为制定有效补给土壤储水的深蓄灌溉制度提供依据。结果表明:深蓄灌溉可有效补充农田土壤水分,灌溉 10 天后不同处理 0—200 cm 土层平均含水率增幅范围为 11.90%~40.85%,T5 处理含水率增幅最高;随着计划储水深度的增加,夏玉米农田蒸散量先增加后降低最后上升至最高水平,在计划储水深度为 90 cm 的处理达到最大;计划储水深度为 60,90 cm 时,补充水量主要用于补给浅层土壤和农田蒸散,不利于进行土壤储水;计划储水深度为 120 cm 以上时,灌水及降雨对深层土壤水分补给量达 243.39 mm 以上,占总供水比重 27.29%以上。综上,深蓄灌溉是有效补充土壤水的灌水方式,选择 120 cm 以上计划储水深度进行深蓄灌溉可有优化水资源配置,补充土壤储水乃至浅层地下水。

关键词: 深蓄灌溉; 夏玉米; 灌溉; 土壤储水; 计划储水深度

中图分类号:S152.7;S513

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)02-0246-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.02.028

Effects of Deep Storage Irrigation on Soil Moisture Dynamics of Summer Maize Farmland

WANG Fang¹, ZHA Qing¹, ZHAO Jie², PANG Yaoyue¹,

SUN Jun¹, MA Yuxin¹, CHEN Dianyu¹, ZHEN Jingbo¹, HU Xiaotao¹

(1.Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in

Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2.Hydrological and Water Resources Survey Centre of Shaanxi, Xi'an 710068)

Abstract: In order to explore the feasibility of supplementing soil water and groundwater by using rainfall and flood resources in flood season, the experiment was carried out in maize field plots from June to October 2020, monitoring the characteristics of soil water dynamic changes under one-time deep storage irrigation with different planned water storage depths (T1: $H_p=60$ cm; T2: $H_p=90$ cm; T3: $H_p=120$ cm; T4: $H_p=150$ cm; T5: $H_p=180$ cm) and saturated water content as the upper limit of irrigation, and studying the quantitative farmland water dynamics of groundwater replenishment, so as to provide the basis for formulating the deep storage irrigation system for effectively replenishing soil water storage. The results showed that deep storage irrigation could effectively replenish the farmland soil moisture. After 10 days of irrigation, the average water content of 0—200 cm soil layer of each treatment increased by 11.90%~40.85%, and the water content of T5 treatment had the highest water content increase. With the increase of the planned water storage depths, evapotranspiration of summer maize farmland increased first, then decreased, and finally rose to the highest level, and the treatment reached the maximum in the 90 cm planned wetting layer. When the planned water storage depths were 60 cm and 90 cm, the supplementary water was mainly used to recharge shallow soil and farmland evapotranspiration, which was not conducive to soil water storage. When

收稿日期:2022-09-01

资助项目:陕西省水利科技计划项目(2022slkj-6);陕西省自然科学基金研究计划重点项目(2022JZ-24)

第一作者:王芳(1998—),在读硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail:wangfang.ns@nwfufu.edu.cn

通信作者:胡笑涛(1972—),教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:huxiaotao11@nwsuaf.edu.cn

the planned water storage depths were more than 120 cm, the water supply of deep soil by irrigation and rainfall was more than 243.39 mm, accounting for more than 27.29% of the total water supply. In conclusion, deep storage irrigation was an effective irrigation method to replenish soil water, and selecting the planned water storage depths above 120 cm for deep storage irrigation could effectively optimize the water resources allocation and replenish shallow soil water storage and even groundwater.

Keywords: deep storage irrigation; summer maize; irrigation; soil water storage; planned water storage depths

陕西关中地处渭河中下游,具有良好的灌溉条件,分布有包括宝鸡峡灌区在内的十大灌区,是陕西省粮食主产区。冬小麦—夏玉米 1 年 2 熟轮作种植是当地一种常见的耕作方式^[1-2],该地区冬季、春季降水较少,冬小麦各生育阶段有效降水量少且分布不均,土壤经常处于水分亏缺状态;夏玉米生育期一般在 6 月上旬至 10 月上旬,大体与汛期耦合^[3-4],降水量丰富。关中地区 20 世纪后期以来日最大降水量显著上升,极端降水增多^[5],全年降水时空分布不均,大量雨洪资源无法得到充分利用;该地区地下水资源量占陕西省地下水资源量的 31.95%,为满足经济社会快速发展的需求,大量开采地下水,出现地下水超采严重的问题^[6]。有研究^[7-8]表明,可利用农田适当蓄积丰水期雨水,以在少量减产损失的基础上提高雨水资源化水平并减少灌溉水量,对于抗旱防洪和补充土壤水库均有重大作用。该地区黄土覆盖深厚,具有疏松、透水等特点,可作为一个贮水和保水性能良好的天然土壤水库,通过大定额灌溉可以显著增加土壤含水量和储水量^[8],其中休闲期降水与 1 m 土层内贮水量呈现为二次函数关系,贮水增量可达到理论最高值 146 mm,2 m 土层实际贮水量可达 230~550 mm;补充水量超过阈值后贮水量增幅减小,贮水效果主要与土壤墒情和水分下渗有关^[9-11]。因此,在常规计划湿润层深度的基础上选择适宜的计划储水深度进行雨洪资源深蓄灌溉对关中地区水资源进行多年调节,可做到“以丰补歉”,使丰水期的雨洪资源储存在地下,持续利用灌溉水以延长该地区地下水的使用寿命,以备需要时开发出来供人们使用,缓解各行业用水矛盾^[12-14]。目前研究主要针对土壤储水能力和灌溉、降水对土壤水分运移影响的成果较多,但针对利用雨洪资源对作物生长农田进行深蓄灌溉以补充土壤储水、改善地下水环境为目标的适宜灌水阈值的研究较少,探究补充水量和土壤储水的转化规律,对指导区域雨洪资源高效利用有重要意义。本研究通过分析不同计划储水深度深蓄灌溉夏玉米农田水分状况,明确夏玉米水分利用规律及农田储水对深蓄灌溉的响应,为量化深蓄灌溉对地下水补给的影响提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2021 年 6—10 月在陕西省杨凌示范区曹新庄试验农场进行。该农场(108°09'E,34°30'N)位于陕西关中平原中部,平均海拔 530 m,年平均气温 12.9℃,年平均降水量 637.6 mm,且多暴雨,秋季则多连阴雨,主要集中在 7—9 月,其中试验期内降水量为 566.6 mm,该年降水量达到丰水年水平。试验地属暖温带半湿润气候区,年累积日照时间 1 900 h,年有效积温(超过 10℃)3 800℃,无霜期 220 天,年蒸发量 900~1 100 mm,地下水埋深达 60 m 以上,试验地含水层包气带厚度大,堆积巨厚的松散堆积体,有良好的储水条件,0—2 m 土层土壤田间持水量 0.21 cm³/cm³,土壤容重 1.47 g/cm³。

1.2 试验设计

供试玉米选用当地普遍种植品种“郑单 958”,种植行距为 70 cm,株距 20 cm,播种量约为 7 万株/hm²。夏玉米于 2021 年 6 月 20 日播种,10 月 13 日收获,期间耕作、施肥、除草等措施与当地农田保持一致。试验设置 5 个计划储水深度(60,90,120,150,180 cm),共计 5 个处理(T1、T2、T3、T4、T5),各处理设置 3 个重复,共计 15 个试验小区,试验田为 10 m×66.7 m,小区面积为 18 m²(3 m×6 m),试验小区按随机区组排列,各小区间设置 1.2 m 宽的保护行,小区地上四周起垄,地下 0—2 m 埋入隔水膜来保证各小区间水分不会产生侧向运移。通过近 10 年降水频率分析,关中地区夏玉米拔节期发生暴雨的可能性达 50%以上,试验选择在拔节期(8 月 4—6 日)利用地表水进行深蓄灌溉,根据灌前实际土壤含水率和不同的计划储水深度计算灌水量,为充分发挥土壤水库储水功能,取灌水上限为饱和含水率,利用水表精确控制灌水量。

1.3 指标测定与计算

土壤水分采用烘干法测定土壤质量含水率,取土深度为 2 m,土层深度为 0—1 m 处每间隔 10 cm 取样,土层深度 1—2 m 处间隔 20 cm 取样,灌水前 1~2 天测定土壤水分以计算灌水量,处理后视天气情况每隔 10~15 天测定 1 次,灌水后和降雨后各加测 1 次。

实际农田蒸散量根据田间土壤水量平衡方程计算^[15]:

$$ET = P_0 + I + G - (W_t - W_0) - R - D \quad (1)$$

式中: ET 为玉米生育期内蒸散量(mm); I 为灌水量(mm); G 为地下水补给量(mm), 由于试验地地下水水位较深, 无法被作物吸收, 故可忽略供给; R 为地表径流量(mm), 试验地地势平坦, 小区四周围土壤, 没有径流流出, 故忽略地表径流, 即 $R \approx 0$; W_0 、 W_t 分别为播种初期和收获时的土壤储水量(mm); D 为深层储水量(mm), D 的计算参照 Riza 等^[16] 和 Ertek 等^[17] 研究结果, 即计算深度的有效土壤储水量加补充水量超过土体田间持水量(θ_{FC})部分渗漏到下层土壤; P_0 为有效降雨量(mm), 夏玉米成熟之后, 在杨凌气象站获取降水数据, 通过采用降水有效利用系数的方法计算得有效降雨量见公式(2)。

$$P_0 = \sigma P \quad (2)$$

式中: P 为降雨量(mm); σ 为降水有效利用系数。本研究中取土壤储水消耗量计算深度为 100 cm。

数据采用 Excel 2010 进行初步处理, 使用 Origin 2021 软件绘图, 利用 IBM SPSS Statistics 30 软件进行数据方差分析(Duncan), 显著性水平 α 取 0.05。

2 结果与分析

2.1 深蓄灌溉和降雨叠加对土壤水分动态的影响

由图 1 可知, 不同处理夏玉米全生育期内 0—100, 100—200 cm 土层的平均含水率均表现为 $T5 > T4 > T3 > T2 > T1$, 且各处理 100—200 cm 土层平均含水率均高于 0—100 cm 土层, 各处理下土层平均含水率波动变化趋势一致。灌水处理 10 天后, 各处理 0—100 cm 土层含水率呈增大趋势, $T1$ 、 $T2$ 处理下土壤水分含量变化相较其他处理平稳, 最大土壤含水率分别为 20.85% 和 21.78%, 最小分别为 15.17% 和 16.06%, 可能是因为部分土壤水分已补给到深层并达到稳定状态, $T3 \sim T5$ 处理在该土层内土壤含水率无显著性差异, 分别为 20.57%, 20.67%, 20.92%, $T2 \sim T5$ 处理的平均土壤含水率显著高于 $T1$ 处理, 分别较 $T1$ 增大 14.54%, 20.28%, 20.96%, 22.14%。全生育期内 $T1$ 处理 100 cm 土层内平均含水率呈先下降灌水后上升最后下降的趋势, 而 $T2 \sim T5$ 处理灌水后呈现先下降后上升最后又下降的趋势。灌水后 $T1$ 和 $T2$ 处理 100—200 cm 土层内土壤含水率缓慢下降, $T3 \sim T5$ 处理平均含水率增幅与灌水量呈正相关, 生育后期降雨是唯一的土壤水分补给源, 持续降雨量大于土壤水分消耗量, 导致土壤含水率升高且处于较高水平, 水分入渗到更深层土壤, 即降雨补给到较深土层。

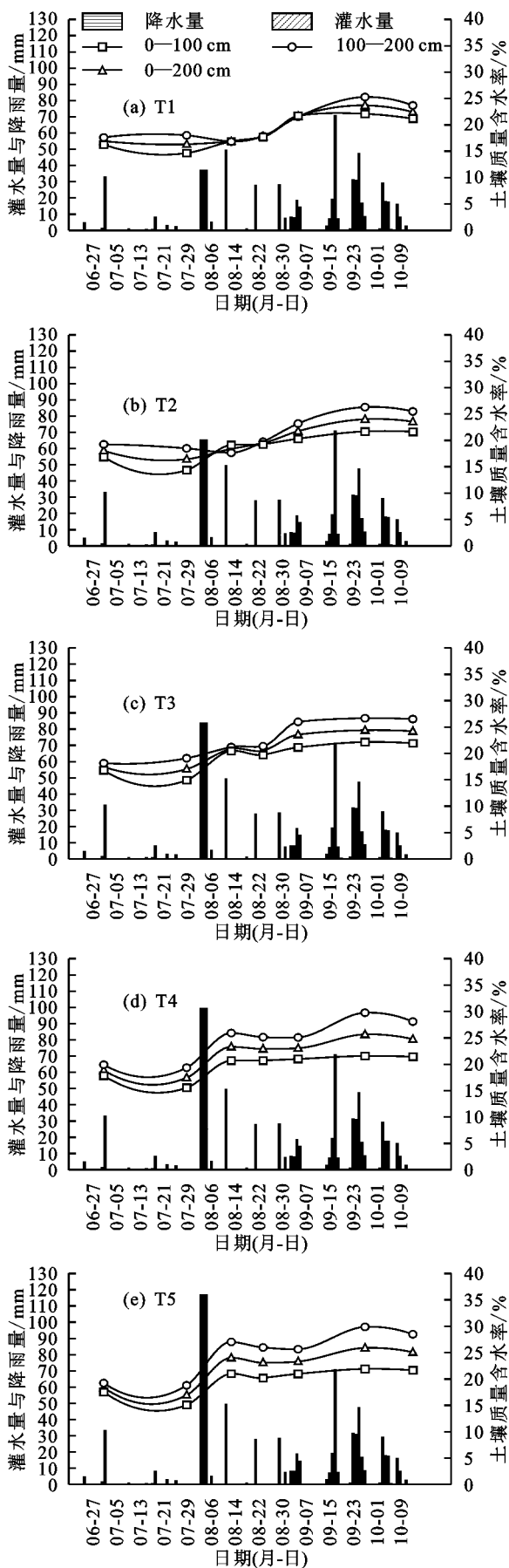


图 1 不同灌水处理土壤剖面平均含水率全生育期动态变化
不同灌水处理下土壤水分动态变化见图 2。灌水前土壤剖面含水率分布曲线呈现“S”形曲线(图

1a);灌后10天,灌水量叠加降雨量使T1~T3处理补充到0—60,0—80,0—100 cm土层的土壤含水率,T4、T5处理主要集中补充在100—200 cm土层。灌水后10天,0—80 cm土层内,T2、T3处理土壤含水率无显著差异($p>0.05$),其中0—10 cm土层内T1处理含水率显著低于T5处理;10—20 cm土层内T1处理含水率显著低于T4、T5处理;各处理在20—50 cm土层内均无显著性差异;50—80 cm内除T1处理以外,其他处理间无显著性差异($p>0.05$);80—180 cm土层内T1、T2处理的含水率显著低于T4、T5处理($p<0.05$);T3~T5处理在120—200 cm土层内土壤含水率随着补充水量的增加而增大,T4、T5处理在140—200 cm土层

含水率均高于25%。灌后20天,由于水分入渗存在滞后,不同土层土壤含水率差异有所变化,表现为各处理土壤含水率在0—50 cm土层内差异性减小,无显著差异($p>0.05$);50—80 cm土层内T1处理土壤含水率显著低于其他处理;80—160 cm土层内T5处理含水率显著高于T1、T2处理($p<0.05$),且在100 cm以下土层与T4处理无显著性差异($p>0.05$);140—200 cm土层内T5与T1处理间差异增大。临近收获期连续降雨使得土壤含水率升高,各处理在纵向剖面上土壤含水率差异减小,在100 cm以下仍表现为T5>T4>T3>T2>T1,T4、T5处理在180—200 cm土层土壤含水率最高(超过30%)。

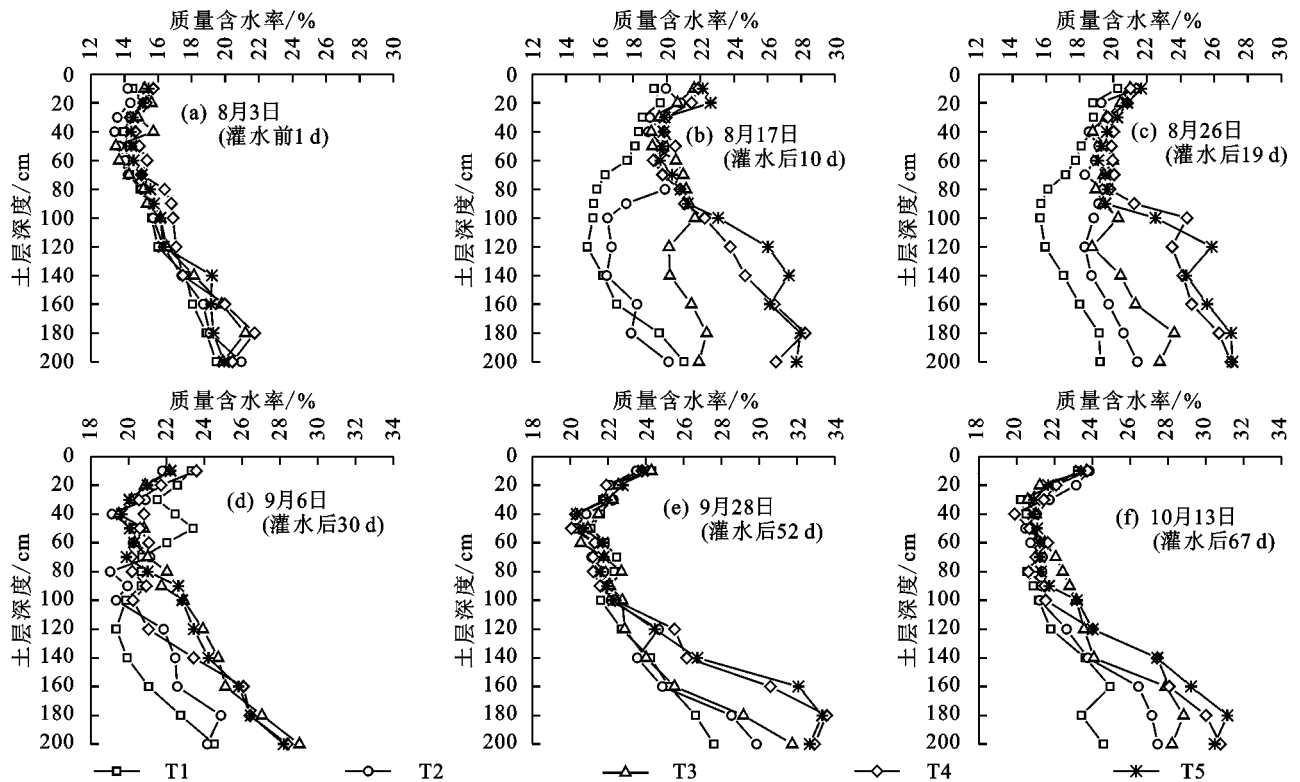


图2 不同处理下夏玉米农田土壤水分分布特征

灌溉10天后各处理0—200 cm土壤剖面储水变化量见图3。通过单因素方差分析,各处理0—60,140—160 cm的土壤水分增量无显著性差异($p>0.05$);60—80 cm土层下T1处理的土壤水分增量显著低于其他处理;80—100 cm土层下灌水量较高的T3~T5处理均显著高于T2、T1处理,且为T1处理增量最小,T5处理的土壤水分增量最大;100—160 cm土层土壤水分增量表现为T5>T4>T3>T2>T1,其中在100—120 cm土层内除T5以外,T3处理与其他处理存在差异但不显著,120—140 cm内T4、T5处理土壤储水增量显著高于T2、T1处理($p<0.05$),140—160 cm处理间无显著性差异($p>0.05$);160—180 cm土层间T5处理土壤水分增量显著高于T2处理,其他3个处理无显著性差异;180 cm以下土壤储

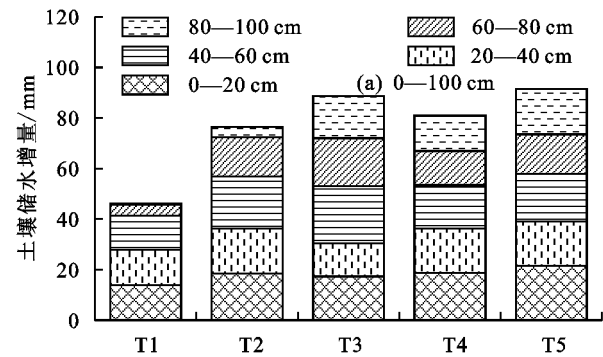
水变化量仍以T5处理最大,T4、T5处理显著高于T2处理,与其他处理无明显差异。由图3可知,较小计划储水深度的深蓄灌溉主要影响100 cm以内土层的土壤储水,计划储水深度增大可以调控100 cm乃至更深层土壤的水分分布(图3b),0—100,100—200 cm土层内土壤水分增量均表现为T5处理的土壤水分增量,100—200 cm土层内土壤水分增量随着灌水量的增大而增大,计划储水深度最大、灌水定额也最大的T5处理在各土层的土壤水分增量均为最大水平。

综上,不同计划储水深度处理下农田0—200 cm土层储水有明显差异,深蓄灌水能有效调控深层土壤水分。

2.2 深蓄灌溉下夏玉米生育期内农田蒸散量分析

夏玉米生育期内各时段农田蒸散量见表1。农

田蒸散量与土壤可供水量和生育期有关,同一生育期不同灌水处理耗水量也有所不同。同处理灌水期间及灌后 10 天(8 月 7—17 日)处理间农田蒸散量存在差异,其中 T2 最高,T1 最低,T1、T4、T5 处理农田水分蒸散量均低于 T2 处理,且随着灌水量的增多而降低;灌后 20 天,处理间蒸散量无显著性差异;8 月 20 日至 9 月 7 日的农田蒸散量表现为 T1 处理显著低于其他处



理;之后 20 天内各处理间无显著性差异;后期随着降雨补充水量的增多,T1 处理蒸散量由最低升至最高,且显著高于 T3 处理,其他处理间无显著差异。全生育期不同处理农田蒸散量变幅为 371.61~476.15 mm,从大到小依次表现为 T2、T4、T5、T3、T1,其中 T2 处理由于根系吸水量多且地面蒸发增大,导致其农田蒸散量较大。

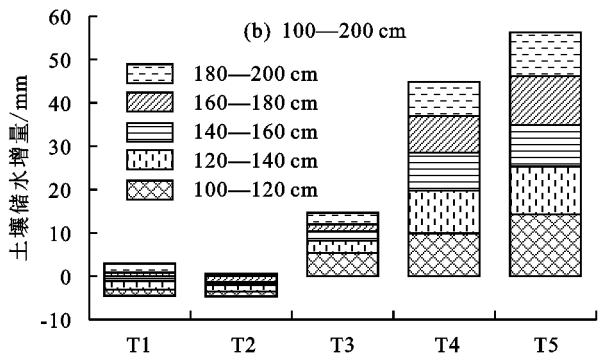


图 3 不同处理灌水 10 天后土壤水分增量层间分布

表 1 不同处理夏玉米农田阶段蒸散量变化

单位:mm

处理时间/ (月-日)	P_0	农田蒸散量				
		T1	T2	T3	T4	T5
06-20—08-03	7.90	33.79±9.69a	47.66±5.84a	37.57±11.72a	44.58±3.19a	47.09±6.68a
08-04—08-17	49.20	114.07±10.20c	159.38±3.29a	139.39±7.96ab	137.63±3.93b	134.08±3.97bc
08-18—08-27	27.60	27.78±5.77a	26.53±2.11a	39.91±0.60a	27.45±3.72a	38.69±5.34a
08-28—09-07	83.80	20.04±4.53b	67.08±9.18a	62.26±10.93a	78.33±9.44a	71.90±3.80a
09-08—09-28	158.60	80.81±5.12a	87.10±1.73a	80.42±7.54a	89.44±2.23a	83.99±1.12a
09-29 日至收获	95.90	95.13±2.72a	88.43±1.87ab	83.89±4.12b	91.40±2.93ab	87.82±3.78ab
06-20 日至收获	423.00	371.61±7.93c	476.15±2.15a	443.42±4.31b	468.81±6.47a	463.55±3.03a

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

2.3 夏玉米农田储水与水分去向分析

夏玉米生育期内各时段农田储水量见表 2。其中深层储水量为农田 1 m 以下土壤储水量,即 0—100 cm 土层有效土壤储水量加补充水量超过 θ_{FC} 部分的水量。分析夏玉米生育期内土壤储水情况发现,灌水前补充水量小于消耗水量,0—100 cm 土层土壤储水量呈下降趋势;灌水期间及灌后 10 天(8 月 7—17 日)内,全生育期 0—100 cm 土层储水量增加幅度为 46.03~91.54 mm,从高到低依次为 T5>T3>T4>T2>T1,T1 处理储水增量显著低于其他处理;随着后续降水的补充及水分入渗的滞后影响,T1 处理 0—100 cm 土层土壤储水量显著升高至与其他处理同一水平,临近收获期,由于降雨量增多,各处理浅层储水量无显著差异($p>0.05$)。灌水 10 天后,深层储水从 T2 处理开始出现并随着计划储水层的增大而增加,且各处理深层储水量间存在显著差异($p<0.05$),以 T5 处理最高,达 207.94 mm;8 月 18 日至 9 月 7 日,各处理并未产生深层储水;9 月 8 日至收获,各处理所形成的深层储水量均无显著性差异($p>0.05$)。

由表 3 可知,整个生育期内不同处理下土壤储水增量占总供水量的比例不同,表现为浅层土壤储水变化量范围为 56.39~80.43 mm,占总供水量的 7.83%~13.84%,从大到小依次为 T1>T2>T3>T5>T4;各处理在全时段的深层储水量范围为 150.73~345.48 mm,以 T5 处理最高,T1 处理最低,且 T1、T2 处理的深层储水量显著低于其他 3 个处理($p<0.05$)。除 T2 处理外,其他处理深层储水量占总供水量的比例均随着灌水量的增多而增大,占比差异性表现与深层储水量一致;整个生育期不同处理下农田蒸散量以 T2、T4、T5 处理为最大水平,并显著高于 T1 处理($p<0.05$);农田蒸散量占总供水量的比例为 55.54%~71.66%,大小关系为 T2>T1>T3>T4>T5。土壤储水量与农田蒸散量占总供水量比例大小规律与灌水量的多少有关,灌水量越多,储水增量与农田蒸散变化量占比越小。

本研究在夏玉米全生育阶段补给试验地深层土壤水量最大可达 345.48 mm,占总供水量 36.13%,充分说明深蓄灌溉灌水入渗深层土壤的水量可以储存在下层土壤,这也表明利用汛期雨洪资源进行储水的有效性。

表 2 不同处理下夏玉米农田水分去向

参数	处理	不同生育时期农田水分变化/mm					
		06-20—08-03	08-04—08-17	08-18—08-27	08-28—09-07	09-08—09-28	09-29—10-13
0—100 cm 土壤储水变化量	T1	−25.89±9.69a	46.03±10.19b	−0.18±5.77a	63.76±14.93a	4.46±18.28a	−14.32±4.14a
	T2	−39.75±5.84a	76.48±8.28a	1.08±2.11a	16.73±9.17b	21.45±7.25a	−1.33±0.45a
	T3	−29.66±11.72a	88.74±9.97a	−12.31±0.60a	21.54±10.93b	15.57±4.57a	−3.46±10.13a
	T4	−36.68±3.19a	80.93±8.18a	0.16±3.72a	5.47±9.43b	8.47±2.09a	−1.96±4.98a
	T5	−39.18±6.68a	91.54±8.00a	−11.09±5.33a	11.91±3.79b	15.14±3.35a	−3.82±3.21a
深层储水量	T1	0	0e	0	0	73.34±13.33a	15.10±5.12a
	T2	0	41.78±9.03d	0	0	50.06±5.69a	8.81±1.73a
	T3	0	105.66±6.50c	0	0	62.61±3.06a	15.49±7.54a
	T4	0	161.92±4.37b	0	0	60.70±4.25a	6.47±2.23a
	T5	0	207.94±4.07a	0	0	59.48±3.23a	11.92±1.12a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 3 全生育期不同处理下夏玉米农田水分去向及其比例

处理	浅层土壤储水		深层土壤储水		农田蒸散	
	储水量/mm	占比/%	储水量/mm	占比/%	储水量/mm	占比/%
T1	73.87±14.57a	13.84±4.73a	150.73±10.34d	16.57±1.61d	371.61±7.93c	69.61±1.49a
T2	74.66±2.07a	12.08±0.59a	153.66±7.91d	16.28±0.79d	476.15±2.15a	71.66±0.46a
T3	80.43±12.59a	11.95±3.24a	243.39±0.35c	27.29±1.24c	443.42±4.31b	60.78±0.64b
T4	56.39±3.38a	7.83±0.82a	302.93±6.18b	31.81±1.20b	468.81±6.47a	60.37±0.90b
T5	64.48±3.27a	8.34±0.74a	345.48±3.22a	36.13±0.09a	463.55±3.03a	55.54±0.40c

3 讨论

3.1 深蓄灌溉对 0—200 cm 土层土壤水分动态的影响

灌水和降雨是影响土壤水分状况的主要因素^[18]。灌溉水在灌溉开始时自地表进入表层土壤,湿润锋不断向下推进,饱和土壤层的厚度不断增大,超过土壤田间持水率的灌溉水在重力及基质吸力作用下向深层土壤运移,使得饱和和层土壤以下的土层土壤含水量也在增加^[8,19]。张立勤等^[20]研究认为,储水灌溉可增加田间土壤储水量,增大灌水定额可以有效提高 0—120 cm 土层贮水量。张敬平^[21]研究表明,利用弃水进行反季节储水灌溉可以补充地下水,达到调节水资源、缓解来水和灌溉用水矛盾的目的。本研究表明,在雨洪期利用深蓄灌溉垂向调蓄土壤水分时选用较大计划储水深度,对增加 0—200 cm 农田土壤储水量的效果明显,随着计划储水深度的增大,土壤储水增量可达 409.96 mm,且集中在更深层,存在补给地下水的可能性。灌水前各处理土壤含水率变化趋势基本一致,灌水后 0—200 cm 土层内平均土壤含水率与灌水量呈正相关,与魏琛琛等^[22]研究结果一致,且土壤水分在土壤空间和时间上分布不均,灌后 10 天,T4、T5 处理下不同土层深度含水率差异分别可达 9.02%和 8.32%。T1 处理的含水率在 40—60 cm 土层超过田间持水量,T2 处理在 10—20,40—60 cm 土层其含水率达到田间持水量,T3 处理在 0—20,40—60,80—

100 cm 土层含水率超过田间持水量,T4、T5 处理除 60—80 cm 外的其他土层均达到田间持水量。

3.2 深蓄灌溉对夏玉米蒸散量的影响

有关灌水量对玉米耗水量及田间深层储水的研究表明,夏玉米生长前期水分消耗主要以棵间蒸发为主,生育后期进入雨季后,随着玉米植株叶面积增大,耗水主要以植株蒸腾为主^[23]。夏玉米拔节期进行深蓄灌水可有效调控 0—200 cm 层土壤水分的时空变化,实现降水和灌溉水的异时空利用;也能调节夏玉米对降雨及土壤水分的利用,尤其是作物根系活动层的土壤水分。本研究各处理夏玉米耗水量在灌水前无差异,灌水期间及灌后 10 天内各处理蒸散量差异增大,这与段伟娜等^[24]研究结果一致。全生育期内各处理玉米蒸散量随着灌水量的增加呈现为先增大后减小最后稳定的趋势,这与段伟娜等^[24]研究的玉米蒸散量随灌水量增加而增加不同。本研究各处理均以饱和含水率为上限,计算灌水量的土层深度超过玉米科学灌溉的计划储水深度,T3、T4、T5 处理下夏玉米蒸散作用相比 T2 处理减弱,但仍比灌水量最小的 T1 处理大,可能是因为本研究采用的深蓄灌溉灌水量较大,造成土壤水分过高,达到抑制夏玉米根系呼吸的水分阈值^[25],且棵间蒸发增大,因此低灌水量下夏玉米蒸散量小于高灌水量处理,且在高灌水量达到灌水阈值后对夏玉米蒸散量有一定的抑制作用。

3.3 深蓄灌溉对夏玉米农田储水的影响

有水分补给农田时,农田土壤剖面储水量升高,当补给水量过大时,土壤水分向下运移可增加大流域的流域基流。李平等^[26]研究表明,灌水定额大于灌溉阈值时,0—200 cm 土层土壤含水率达到田间持水量后,出现灌溉水深层渗漏的现象。本试验表明,灌水后 10 天内,储水土层深度为 90 cm 以上的处理造成部分灌溉水深层渗漏补给深层土壤,因此当储水土层深度为 90 cm 时,灌水上限取为饱和含水率时所计算得的灌水量(195.40 mm)叠加后续 10 天有效降雨(49.20 mm)超出本地区农田浅层土壤储水上限,形成对深层土壤水分甚至地下水的补给;T1、T2 处理的深层储水量为最低水平,即 120 cm 以上计划储水深度的深蓄灌溉能使农田储存更多土壤水分。灌溉处理后随着水分入渗和后期降雨的补充,各处理的深层储水量表现在同一水平,前期灌水量大的处理,土壤水分下移,补充深层土壤水分,后期叠加降雨弥补灌水量小引起的差异,其中大灌水量更有利于土壤水分运移到深层,可能补给浅层地下水,改善土壤水生态。全生育期内 T4、T5 处理下 0—100 cm 土层土壤储水变化量占总供水量比值显著低于其他 3 个处理,可能是由于总供水量基数较大,其中 T3 处理浅层土壤水分增量最高,达 80.43 mm。T1~T5 处理 0—200 cm 土壤储水量在收获期较灌水前增加 26.86%~35.38%;总储水量大小表现为 T5>T4>T3>T2>T1,T5 处理显著高于 T1 处理($p<0.05$),与 T2、T3、T4 处理无显著性差异。在夏玉米农田进行深蓄灌溉处理及叠加后续有效降雨(415.10 mm)后,全生育期内各处理在试验小区内发生深层储水补给量占总供水量比值为 16.28%~36.13%,充分说明高储水深度的深蓄灌溉形成深层储水补给土壤水分和地下水,且该过程主要发生在灌水后及持续降水期间,与前人^[10,27-28]研究结果一致。

4 结论

- (1)大定额深蓄灌溉是改变土壤储水的主要原因,可显著提高田间土壤含水率,并通过渗漏补充深层土壤储水量,但降雨会减小处理间土壤水分的差异。
- (2)关中地区夏玉米农田 60 cm 计划储水深度的深蓄灌溉储水量较少,计划储水深度为 90 cm 的深蓄灌溉其农田蒸散消耗 70% 以上的供水量,不利于储水,因此将深蓄灌溉计划储水深度控制在 120 cm 及以上利于“多余”的灌溉水储存在 1 m 及以下的农田土壤水库中。
- (3)农田水分状况受气候影响较大,本研究是试验地区在特定水文年型条件下实现的,深蓄灌水的有

效性还需考虑作物生理生长、产量及水文年型差异。因此,利用雨洪资源补充深层土壤水分的综合效益还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] Yang X Y, Sun B H, Zhang S L. Trends of yield and soil fertility in a long-term wheat-maize system[J].Journal of Integrative Agriculture,2014,13(2):402-414.
- [2] Zhang S L, Gao P C, Tong Y N, et al. Overcoming nitrogen fertilizer over-use through technical and advisory approaches: A case study from Shaanxi Province, northwest China[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2015,209:89-99.
- [3] 姚德龙,高繁,李志军,等.杨凌地区冬小麦—夏玉米水分供需适配性分析[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):115-120.
- [4] 雷向杰,李茜,王娟,等.陕西关中地区旱涝演变规律和 21 世纪旱涝特点分析[J].灾害学,2016,31(3):101-109.
- [5] 郑小华,娄盼星,刘环,等.陕西极端降水时空变化特征研究[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(4):9-16.
- [6] 李泽洲.新形势下加强陕西省地下水水位水量控制目标考核的思考[J].中国水利,2021(7):60-62.
- [7] 陈朱叶,郭相平,姚俊琪.水稻蓄水控灌的节水效应[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(4):426-430.
- [8] 杨普义,蔡金丽.汾河灌区特殊水文地质条件下大定额灌溉的有效性[J].水利规划与设计,2017(1):14-16.
- [9] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等.晋南旱地麦田夏闲期土壤水分和养分变化特征[J].应用生态学报,2013,24(6):1601-1608.
- [10] 贾建英,贺楠,韩兰英,等.黄土旱塬区麦田休闲期降水与土壤贮水的变化特征[J].水土保持研究,2022,29(6):97-103.
- [11] 邓振镛,张强,王强,等.黄土高原旱作区土壤贮水力和农田耗水量对冬小麦水分利用率的影响[J].生态学报,2010,30(14):3672-3678.
- [12] 张新民,马忠民,胡想全,等.节水型冬季储水灌溉技术及其应用前景[J].中国农村水利水电,2007(3):48-49,54.
- [13] 钟华平.地下水管理若干问题思考[J].水利发展研究,2022,22(3):7-10.
- [14] Tulip S S, Siddik M S, Islam M N, et al. The impact of irrigation return flow on seasonal groundwater recharge in northwestern Bangladesh [J]. Agricultural Water Management,2022,266:e107593.
- [15] 周始威.基于 RZWQM2 模拟的西北旱区玉米控墒补灌模式下水氮最优调控研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [16] Riza K, Attila Y, Sermet Ö, et al. Irrigation response of Pistachio (*Pistacia vera* L.)[J].Irrigation Science,1993,14(1):7-14.

径流量及径流泥沙颗粒机械组成规律[J].水土保持学报,2012,26(2):62-65.

[9] 何彦星,张风宝,杨明义.¹³⁷Cs 示踪分析东北黑土坡耕地土壤侵蚀对有机碳组分的影响[J].农业工程学报,2021,37(14):60-68.

[10] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报,2020,34(3):73-78.

[11] 王小康,谷举,刘刚,等.横、顺坡垄作对黑土坡面侵蚀—沉积周期规律的影响[J].土壤学报,2022,59(2):430-439.

[12] Kladvik E J, Griffith D R, Mannering J V. Conservation tillage effects on soil properties and yield of corn and soya beans in Indiana [J]. Soil and Tillage Research,1986,8:277-287.

[13] 邱野,王瑄.耕作模式对坡耕地土壤水分和大豆产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):128-137.

[14] 刘兴土,阎百兴.东北黑土区水土流失与粮食安全[J].中国水土保持,2009(1):17-19.

[15] 魏永霞,王鹤,吴昱,等.生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):231-240.

[16] 沈紫燕,王辉,平李娜,等.前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):58-62.

[17] 王辉,王全九,邵明安,等.翻耕与压实对坡地土壤溶质迁移过程的影响[J].中国水土保持科学,2008,6(6):21-25,86.

[18] 王辉.降雨条件下黄土地地养分迁移机理及模拟模型[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2006.

[19] 孙艳,李四高,张楠,等.不同农作处理对西南土石山区坡耕地水土流失特征的影响[J].安徽农业科学,2017,45(33):118-120.

[20] 田英,赵西宁,陈小莉,等.小麦/玉米垄沟套作条件下施肥部位对土壤水分分布的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):72-78.

[21] 姜振萃,闵炬,陆志新,等.机械起垄侧条施肥对大白菜产量和氨挥发的影响[J].土壤,2020,52(1):10-15.

[22] 刘波. 耕作措施对黑土坡耕地氮磷养分平衡的影响[D].长春:吉林大学,2018.

[23] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):26-33.

[24] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J].水土保持学报,2018,32(6):28-33.

(上接第 252 页)

[17] Ertek A, Sensoy S, Gedik I, et al. Irrigation scheduling based on pan evaporation values for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown under field conditions [J]. Agricultural Water Management,2006,81(1/2):159-172.

[18] 黄玲,高阳,邱新强,等.灌水量和时期对不同品种冬小麦产量和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2013,29(14):99-108.

[19] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.半干旱地区半流动沙丘水分深层渗漏量及其对降雨格局的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2710-2720.

[20] 张立勤,马忠明,杨君林,等.储水灌溉及覆膜对土壤水分及小麦出苗的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):103-106.

[21] 张敬平.反季节储水灌溉土壤水分有效性分析[J].山西水利,2007(1):66-67.

[22] 魏琛琛,任树梅,徐子昂,等.灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J].农业机械学报,2021,52(7):251-260.

[23] 张建军,樊廷录,党翼,等.覆膜时期与施氮量对旱地玉米土壤耗水特征及产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(6):72-78.

[24] 段伟娜,徐家屯,曹玉鑫,等.夏玉米不同生育期亏缺一复水对蒸发蒸腾和产量的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(2):18-26.

[25] Tian L, Zhang Y, Chen P, et al. How does the water-logging regime affect crop yield? A global meta-analysis[J].Frontiers in Plant Science,2021,12:e634898.

[26] 李平,樊向阳,齐学斌,等.石津灌区储水灌溉条件下土壤水分动态及灌水适宜阈值研究[J].灌溉排水学报,2010,29(4):59-62.

[27] 罗帅,冯浩,李成,等.旱区垄膜沟灌不同灌水量对土壤水盐及春玉米产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):259-266.

[28] 冯浩,王杰,王乃江,等.起垄覆膜条件下夏玉米农田耗水过程分析[J].农业机械学报,2018,49(9):205-213.