

# 栽培方式对冬小麦耗水量、产量及水分利用效率的影响

刘俊明<sup>1,2</sup>, 高阳<sup>1</sup>, 司转运<sup>1,2</sup>, 武利峰<sup>3</sup>, 段爱旺<sup>1</sup>

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,农业农村部作物需水与调控重点实验室,河南新乡453002;  
2.中国农业科学院研究生院,北京100081;3.山东省滨州市农业科学院,山东滨州256600)

**摘要:**为探究不同栽培方式对冬小麦生长发育、产量形成及水分利用的影响。通过田间试验,设置传统畦田种植(TC)、垄作种植(RC)和高低畦田种植(HLC)3种栽培方式,其中RC和HLC种植模式分别设置3种灌溉处理(900,720,540 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),以TC的常规灌溉(900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)作为对照,研究3种栽培方式下冬小麦生育期内的土壤水分变化与耗水规律,分析栽培方式对产量构成要素和水分利用效率的影响。结果表明:不同栽培方式下冬小麦各生育期的土壤含水量变化具有显著差异,RC处理的集雨储水能力相对较强;栽培方式对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响也达到显著水平。冬小麦产量和耗水量间呈现极显著的正相关关系( $R^2=0.86, P<0.01$ );栽培方式对冬小麦亩成穗数和穗粒数具有显著差异;与RC和TC栽培方式相比,HLC栽培方式下群体及个体的发育相对更好,亩成穗数和穗粒数显著提高;相比TC和RC,HLC栽培方式下冬小麦耗水总量分别提高14.16%和19.90%,产量分别提升22.63%和27.37%,水分利用效率(WUE)分别提升7.69%和6.87%。综合来看,HLC栽培方式可显著提高冬小麦的产量和水分利用效率,是研究区域较为理想的节水高产栽培模式。

**关键词:**冬小麦;栽培方式;产量;产量构成因素;耗水量;水分利用效率

中图分类号:S275.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0210-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.030

## Effects of Cultivation Methods on Water Consumption Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat

LIU Junming<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>1</sup>, SI Zhuanyun<sup>1,2</sup>, WU Lifeng<sup>3</sup>, DUAN Aiwang<sup>1</sup>

(1.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences,

Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture and

Rural Affairs, Xinxiang, Henan 453002; 2.Graduate School of Chinese Academy of Agriculture Sciences,

Beijing 100081; 3.Binzhou Academy of Agricultural Sciences, Shandong Province, Binzhou, Shandong 256600)

**Abstract:** To study the effects of different cultivation methods and irrigation schedules on growth, yield, and water use of winter wheat, three cultivation modes were conducted with field experiment in Shandong province: Traditional Cultivation (TC), Ridge Cultivation (RC), and High and Low Cultivation (HLC), three levels of irrigation quota (900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 720 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 540 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) were set up in RC and HLC respectively, while there was only 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> irrigation quota for TC. The changes in soil moisture, water consumption, and water use efficiency (WUE) of winter wheat in the three cultivation methods were studied. The results showed: the soil water content of winter wheat at different growth stages was significantly different under different cultivation methods, and the ability of storing rainfall in RC method was better than the other two methods. The cultivation methods had significant effects on the water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat, and there was a significant positive correlation between winter wheat yield and water consumption ( $R^2=0.86, P<0.01$ ). Compared with RC and TC, the wheat of HLC developed vigorously, with higher number of panicles and grains per mu. The total water consumption under HLC method was 14.16% and 19.90% higher than that of TC and RC respectively, while the yield of HLC was 22.63%

收稿日期:2019-07-01

资助项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3);水利部行业专项(201501017)

第一作者:刘俊明(1995-),男,硕士研究生,主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail:82101172099@caas.cn

通信作者:段爱旺(1963-),男,研究员,主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail:duanaiwang@aliyun.com

and 27.37% higher than that of TC and RC respectively. Furthermore, the WUE of HLC was 7.69% and 6.87% higher than that of TC and RC. Overall, HLC cultivation can significantly improve the yield and WUE of winter wheat, and it could be an ideal water-saving and high-yield cultivation method in the study area.

**Keywords:** winter wheat; cultivation method; yield; yield components; water consumption; water use efficiency

华北平原是我国重要的冬小麦生产区之一,冬小麦产量约占全国总产量的 50%<sup>[1]</sup>,同时该区域的冬小麦生育期正处于年际降水相对较少的时间段内,为了获得高产稳产,需要进行多次灌溉,因此冬小麦是消耗灌溉用水最多的作物之一。华北地区降水量普遍较少,水资源供需矛盾突出,严重缺水已经成为制约冬小麦生产可持续发展的最重要因素,通过节水技术的研发与应用,从而提高小麦的水分利用效率(WUE),已成为保证冬小麦生产可持续发展的关键<sup>[2]</sup>。为了提高冬小麦的 WUE,国内外许多学者对改进冬小麦栽培方式的效果进行了研究,通过栽培方式来改善土壤结构特征,以增加对降雨和灌溉水的储存与利用,同时降低作物耗水量,从而提高水分利用效率。已有研究<sup>[3-4]</sup>表明,冬小麦传统畦田种植方式由于畦田过长、地面不平等原因,使得水流推进阻力大且灌溉历时长,导致实际灌水定额远高于设计定额,水分利用效率低,水资源浪费严重等后果。垄作栽培方式改变了地表结构,灌水水流沿沟推进,不仅提高流速、减小灌水历时,而且能够加大土壤对降雨和灌溉水的富集效应,增加土壤储水量,并可改变灌溉水分布特性,减少地面蒸发量,提高水分利用效率<sup>[3]</sup>。Wang 等<sup>[5]</sup>将传统畦田种植和垄作种植方式进行对比,发现垄作种植可节水 30%,冬小麦产量和水分利用效率都能够得到提高;汪顺生等<sup>[6]</sup>和高传昌等<sup>[7]</sup>的研究同样发现,相对于传统畦田种植,垄作种植可分别节水 30%和 40%,且提高了降雨的利用率;马丽等<sup>[8]</sup>的研究表明,垄作模式节水效果明显,总耗水量可降低 9.20%~14.20%,水分利用效率可提高 13.20%~23.40%。近年来,滨州市农业科学院研发了一种小麦高低畦种植模式<sup>[9]</sup>,该模式将土地整成高、低畦相间的平面,2 个畦面均种植小麦,灌溉时只在低畦浇水,高畦通过低畦水分侧渗来满足小麦耗水需求。高低畦种植模式具有较好的节水增产潜力<sup>[10]</sup>。但是,前人对冬小麦种植方式的研究主要集中于畦田和垄作种植,对于高低畦种植这种较新的种植模式,还未进行系统的研究和比较分析。因此,本文通过田间试验,对垄作种植、高低畦种植和传统畦田种植模式下冬小麦的耗水规律、产量形成和水分利用效率进行系统比较,研究结果可为冬小麦节水栽培模式的改进完善及生产实

践中的选择应用提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2017—2018 年冬小麦生长季在山东省滨州市博兴县店子镇马庄村(118.29°E, 37.06°N)进行。试验区地处鲁北平原,地貌类型为黄河冲积平原,土壤质地为粉砂壤土,0—150 cm 土层平均干容重为 1.50 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为 22%(质量含水率)。该区属于温带大陆性季风气候区,多年平均气温 12.5 °C,年日照时间 2 595 h,降水量 601 mm,无霜期 180 d。该区域是华北平原重要的冬小麦生产区,作物种植模式以冬小麦—夏玉米一年两熟为主。

### 1.2 试验设计

试验设置栽培方式和灌水定额 2 个试验因素,其中栽培方式因素设置当地常规栽培(TC,畦作)、垄作栽培(RC)和高低畦栽培(HLC)3 个水平,3 种栽培方式的小麦行田间布设方式见图 1;灌水定额设置 3 个水平,但只在 RC 和 HLC 上实施,分别为:高水处理,灌水定额与当地常规栽培模式的灌水定额相同,即 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;中水处理,灌水定额为高水处理的 80%,即 720 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;低水处理,灌水定额为高水处理的 60%,即 540 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;以当地常规栽培(TC)下的常规灌溉管理作为对照,共计 7 个处理,重复 3 次。

冬小麦试验田足墒播种,生育期内通过监测土壤含水量来进行灌溉,当 1 m 土层平均含水量降到田间持水量的 60%时即实施灌溉。生育期内总共进行了 2 次灌水,冬灌于 2017 年 11 月 12 日实施,所有处理灌水定额相同,均为 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;春灌于 2018 年 4 月 2 日进行,不同处理的灌水量见表 1,灌溉水源为地下水。

试验用冬小麦品种为当地的主栽品种“济麦 22”,播量为 120 kg/hm<sup>2</sup>,于 2017 年 10 月 5 日播种,2018 年 6 月 8 日收获。所有处理肥料用量完全相同,纯 N 均为 240 kg/hm<sup>2</sup>,按基追比 5:5 施用;纯 P 和纯 K 均为 120 kg/hm<sup>2</sup>,作为基施在播前整地时一次性施入(注:尿素 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 的有效含氮量 45%、重过磷酸钙的有效含磷量为 40%、氯化钾的有效含钾量 60%)。

2017—2018 冬小麦生长季总降水量为 253.50 mm(有效降水量为 234.90 mm),具体分配情况见图 2。

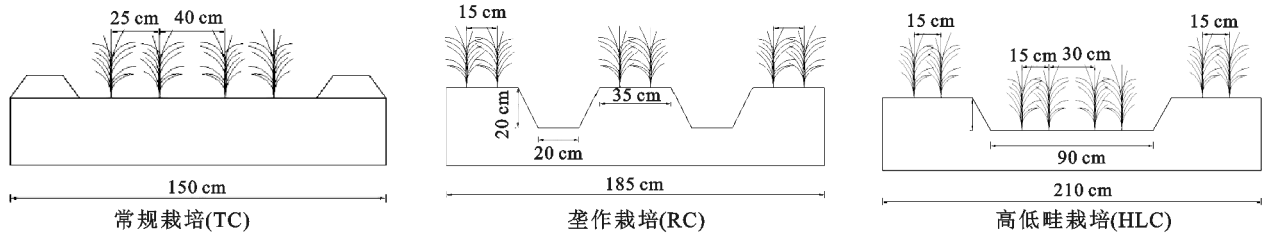


图 1 不同栽培方式下冬小麦田间布设示意

表 1 不同试验处理编号及处理方法

处理序号	处理编号	栽培方式	灌溉处理	灌水定额/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )
1	TC	传统畦作	CK	900
2	RCH	垄作	高水	900
3	RCM	垄作	中水	720
4	RCL	垄作	低水	540
5	HLC-H	高低畦	高水	900
6	HLC-M	高低畦	中水	720
7	HLC-L	高低畦	低水	540

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 土壤含水量** 冬小麦播种前及各个生育期和收获后取土测土壤含水量,土层测定总深度为 150 cm,共分 10 个层次测定,依次为 0—5,5—10,10—20,20—30,30—40,40—60,60—80,80—100,100—120,120—150 cm。RC 处理取土样时,分别在垄顶中部和沟底中部各取 1 个样,最终取平均值使用;HLC 处理分别在高畦中心和低畦中心上各设 1 个样点,取 2 点平均值使用;TC 处理则在畦中心位置设置 1 个样点。

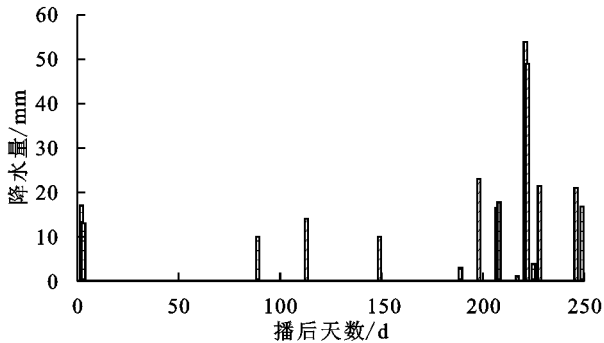


图 2 冬小麦生育期降水量分布

**1.3.2 农田耗水量和水分利用效率的计算** 农田耗水量利用土壤水量平衡方程计算:

$$ET_c = P + I + \Delta WK - \Delta R + \Delta SW$$

式中: $ET_c$ 为农田耗水量(mm); $P$ 为降水量(mm); $I$ 为灌水量(mm); $\Delta WK$ 为土壤 150 cm 深处界面上的垂向水分交换量(mm); $\Delta R$ 为地表水平径流交换量(mm); $\Delta SW$ 为作物生育期开始与结束时土壤含水量变化量(mm)。由于试验区每个小区周边都筑有高畦埂,冬小麦生育期未发生因降水或灌溉引起的地面径流入或流出现象,因此  $\Delta R$  按 0 处理;地下水位较深(>30 m),且在试验过程中没有发生深层渗漏,因此  $\Delta WK$  可按 0 处理。

降雨占全生育期总耗水的比例=全生育期有效降雨量/全生育期总耗水量;灌溉水占全生育期总耗水的比例=全生育期灌溉总量/全生育期总耗水量;土壤储水占全生育期总耗水的比例=播种期与收获期间土壤储水变化量/全生育期总耗水量。

耗水模系数  $E_P$  = 某个生育阶段的农田耗水量/全生育期农田耗水量  $\times 100\%$ ;日耗水量  $ET_D$  = 生育阶段总耗水量/生育阶段持续天数;水分利用效率(WUE) = 籽粒产量/全生育期农田耗水量( $\text{kg}/\text{m}^3$ );(灌溉水+降水)利用效率(WUE<sub>i+p</sub>) = 籽粒产量/(全生育期灌溉总量+降水总量)。

**1.3.3 产量测定** 测产在冬小麦成熟后、收割前进行,每个小区选取 1  $\text{m}^2$  的样方,收获样方内全部地上部样品,装入网袋内,带至室内进行人工考种,统计有效穗数,随机选取 10 株确定平均穗粒数;之后将所有样品在自然条件下晒干,用小型脱粒机脱粒后计取产量,折算成标准含水量(14%)下的产量使用。从脱粒后的籽实中随机数取 3 个 1 000 粒(同样折算成 14% 的标准含水量),分别用天平称重,取 3 个样本的平均值作为千粒重值使用。

### 1.4 统计分析

试验数据采用 Origin 2016 软件处理和作图,用 SPSS 24.0 软件进行统计分析,并用 LSD 法检验差异显著性,显著水平设定为  $\alpha = 0.05$ ,极显著水平设定为  $\alpha = 0.01$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培方式下麦田土壤含水量的变化

由图 3 可知,不同栽培方式下(TC、RCH、HLC-H)的土壤水分状况具有显著差异( $P < 0.05$ ),且随着土层深度增加和生育期的后移差异逐渐变大( $P < 0.05$ )。在冬小麦返青期,TC、RC、HLC 3 种处理的土壤水分垂直分布趋势基本一致。在拔节初期灌水后,与灌水前相比较,各栽培方式在 0—150 cm 土壤含水量分布相对均匀。RC 和 HLC 受地表结构的起伏影响,通过沟或低畦灌入水流只能通过侧渗和毛管力作用到达垄或高畦部分,因此 TC 处理的表层土壤含水量(0—30 cm)高于 RC 和 HLC。冬小麦孕穗期、开花期、灌浆期分别降雨 23.0,34.3,92.2 mm,降雨量较大,蒸发强烈,3 种栽

培方式水分变化趋势基本相同。由于 HLC-H 种植密度较大,耗水强度较高,因此 0—150 cm 土层内土壤含水量均表现为 HLC-H 显著低于 TC 和 RCH。灌浆期内有 2 次连续较大的降雨(累计 92.2 mm),显

著增加了 0—100 cm 土层含水量,满足了作物生长需求。冬小麦收获期,TC 和 RCH 栽培方式的土壤含水量均显著高于 HLC-H,各栽培方式间 100—150 cm 土壤含水量也明显降低。

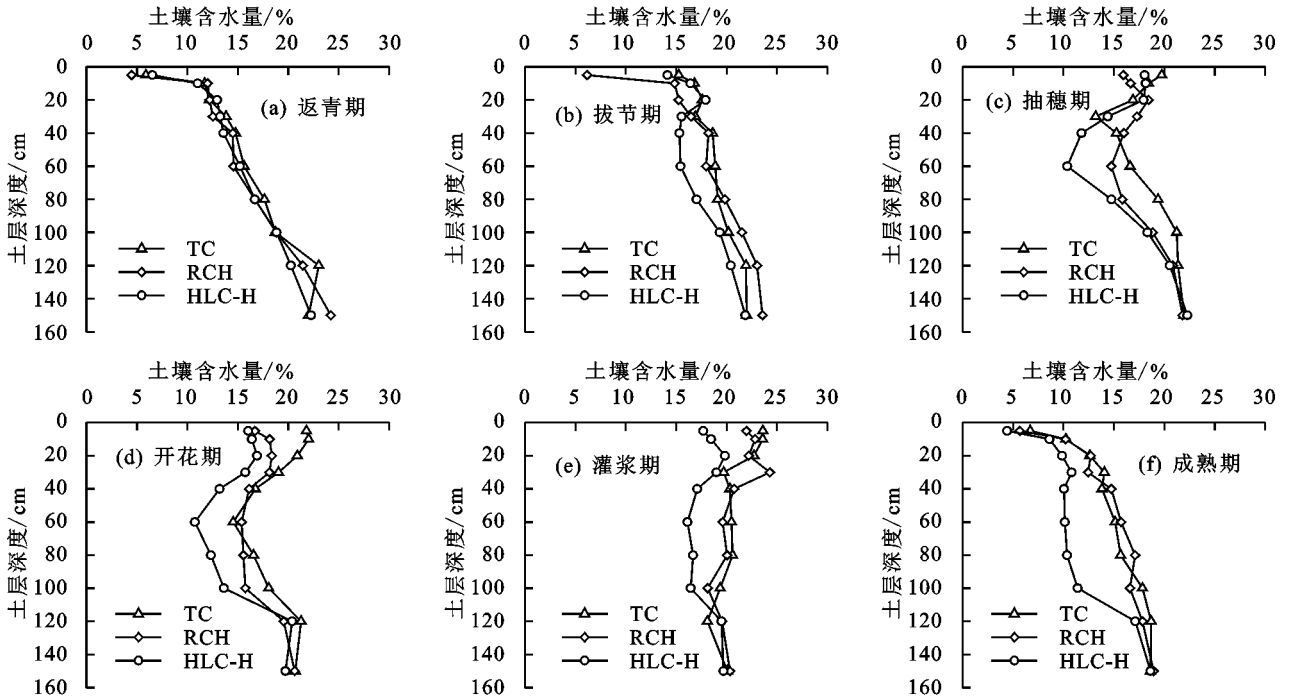


图 3 不同栽培方式下冬小麦生育期 0—150 cm 土层含水率变化

2.2 不同栽培方式对冬小麦全生育期耗水量的影响

由表 2 可知,冬小麦生育期的水分来源主要由降雨、灌溉水和土壤储水等构成。不同栽培方式下冬小麦全生育期的耗水量存在明显的差异( $P < 0.05$ )。随着灌水量的增加,总耗水量增加,来自灌溉水的份额也呈现逐步增加的趋势,相应地降雨和土壤储水的贡献率则呈逐渐降低的趋势。在灌水量相同的条件下(以充分供水处理为例),冬小麦耗水总量表现为 RC 栽培方式 < TC 栽培方式 < HLC 栽培方式。从总耗水中水分来源构成看,与 RCH 相比,TC 和 HLC-H 栽培模式下来自降雨

的份额分别减少了 2.34% 和 9.15%,来自灌溉水的份额分别减少了 1.72% 和 5.96%,而来自土壤储水的份额分别增加了 4.07% 和 14.13%。RC 栽培方式对降雨和灌溉水的利用率明显高于其他栽培方式,说明与 HLC 和 TC 模式相比,RC 模式能够很好地利用垄沟结构富集降水和灌水,从而增加土壤贮水量供作物根系吸收利用。而与 RCH 相比,RCM 和 RCL 模式显著提高土壤储水的利用份额,说明 RC 模式下适度的水分亏缺可以增加冬小麦对土壤贮水的利用程度,而灌水量过多则会减少作物对土壤贮水的利用。

表 2 不同栽培处理下冬小麦耗水总量及来源结构

处理	耗水量/mm	总耗水的水分来源					
		降雨		灌溉		土壤储水	
		总量/mm	比例/%	总量/mm	比例/%	总量/mm	比例/%
TC	504.30d	234.90	46.58b	180.00	35.69b	89.40b	17.73b
RCH	480.17e	234.90	48.92a	180.00	37.49a	65.27c	13.59c
RCM	474.35e	234.90	49.52a	162.00	34.15c	77.45bc	16.33b
RCL	464.19e	234.90	50.60a	144.00	31.02d	85.29b	18.37b
HLC-H	575.71a	234.90	39.97e	180.00	30.63d	160.81a	29.39a
HLC-M	551.39b	234.90	42.60d	162.00	29.38e	154.49a	28.02a
HLC-L	527.31c	234.90	44.55c	144.00	27.31f	148.41a	28.14a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

2.3 不同栽培方式对冬小麦耗水规律的影响

由表 3 可知,不同栽培模式间各生育阶段耗水总量( $ET$ )、日均耗水量( $ET_D$ )和耗水模数( $E_P$ )之间存

在明显的差异( $P < 0.05$ )。播种到返青期,冬小麦群体较小,水分消耗以地表蒸发为主,与其他生育时期相比,总耗水量相对较少。但由于不同栽培模式的土

壤地表结构有较大差异,土壤的水热特性状况、蒸散发状况也有所不同,从而使得 3 种栽培方式之间的耗水规律( $ET$ 、 $ET_D$ )存在明显差异,从总耗水量上来看,由低到高的顺序为  $RC < TC < HLC$ 。

拔节—孕穗期,小麦进入需水关键期,此时大气温度明显升高,蒸发变强,日均耗水强度相比播种—返青期明显增加,且不同灌水条件下增加的幅度不同,高水、中水、低水的增加幅度分别为 217.54%~297.52%,252.90%~263.46%,203.31%~238.46%。在 HLC 栽培方式下,不同灌水处理的耗水量存在明显差异( $P < 0.05$ ),耗水量呈现随着灌水量的增加而增加的趋势。在 RC 栽培方式下,虽然耗水量也呈现出随灌水量增加而增加的同趋势,但不同灌水处理之间的耗水量没有表现出明显的差异。在播种—返青期,RC 栽

培方式的耗水量低于 TC,但在拔节—孕穗期反而高于 TC,一方面可能是因为灌水后田间土壤含水率增加;另一方面可能为与 TC 相比,RC 垄上部分接收太阳辐射更为强烈,以及沟中通风加大了蒸散发<sup>[11]</sup>。

开花—成熟期是冬小麦产量形成的关键时期,日耗水量也最大,最高可达 6.27 mm/d,最低也有 5.11 mm/d。由于该阶段降雨量占耗水量的 70.40%~86.31%,且在灌浆期 2 次连续降雨达 92.20 mm,因此造成 RC 栽培方式不同灌水处理之间的耗水量无明显差异,而对于 HLC—L、HLC—H 和 HLC—M 而言,该生育期的耗水总量还是有着明显的差异。在相同灌水量条件下,不同栽培方式之间的耗水量表现出显著的差异( $P < 0.05$ ),大小顺序为  $RC < TC < HLC$ ,说明栽培方式对冬小麦的用水需求具有显著的影响。

表 3 不同栽培处理下冬小麦各生育期耗水量及耗水模数

处理	播种—返青期			拔节—孕穗期			开花—成熟期		
	$ET/mm$	$ET_D/(mm \cdot d^{-1})$	$E_p/\%$	$ET/mm$	$ET_D/(mm \cdot d^{-1})$	$E_p/\%$	$ET/mm$	$ET_D/(mm \cdot d^{-1})$	$E_p/\%$
TC	204.02b	1.14b	40.46a	108.50c	3.62c	21.51b	191.79c	4.92c	38.03a
RCH	185.51c	1.04c	38.63ab	115.24c	3.84c	24.00ab	179.42d	4.60d	37.37a
RCM	185.51c	1.04c	39.11ab	113.47c	3.78c	23.92ab	175.36d	4.50d	36.97a
RCL	185.51c	1.04c	39.96ab	105.46c	3.52c	22.72ab	173.22d	4.44d	37.32a
HLC—H	216.70a	1.21a	37.64b	145.77a	4.81a	25.27a	214.37a	5.51a	37.16a
HLC—M	216.70a	1.21a	39.30ab	128.04b	4.27b	23.22ab	206.59b	5.30b	37.47a
HLC—L	216.70a	1.21a	41.10a	110.10c	3.67c	20.88b	200.51c	5.14c	38.03a

#### 2.4 不同栽培方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响

由表 4 可知,不同处理间冬小麦的产量存在显著差异( $P < 0.05$ ),且随着灌水量的增加,产量呈现增加的趋势。在灌水量相同的条件下(以充分供水处理为例),冬小麦产量表现为:RC 栽培方式 < TC 栽培方式 < HLC 栽培方式,且 HLC—H 产量较 TC 和 RCH 分别提高 22.63%和 27.37%。从产量构成因素来看,HLC 栽培方式的成穗数和穗粒数要显著高于 TC 和 RC,而 TC 比较于 RC,TC 的成穗数及千粒重较高。在 RC 栽培方式下,随着灌水量的增加,产量也呈现不断增加的趋势,但不同水分处理间的产量差异并没有达到显著水平( $P > 0.05$ )。产量构成因素中,除了穗粒数差异达到显著水平外,RC 水分处理之间的成穗数和千粒重均不显著。而在 HLC 栽培方式下,不同灌水处理间在产量和水分利用效率之间存在显著差异( $P < 0.05$ ),高水水分处理的产量处于最佳状态,但相对于中水处理的增加幅度不明显,但高水和中水处理都明显高于低水处理。从表 4 还可以看到,与 HLC—L 处理相比,HLC—H 和 HLC—

M 处理的产量分别提升 3.67%和 1.74%,WUE 分别降低 5.00%和 2.10%,说明灌水量过多,产量虽增加,但水分利用效率 WUE 却会相对降低。不同栽培方式间冬小麦的 WUE 也存在显著差异( $P < 0.05$ )。在灌水量相同的条件下,冬小麦 WUE 表现为 RC 栽培方式 < TC 栽培方式 < HLC 栽培方式,且(灌溉水+降水)水分利用效率  $WUE_{i+p}$ 也表现出同样的规律。在同一栽培方式下(以 HLC 栽培方式为例),随着灌水量的增加,WUE 和  $WUE_{i+p}$ 均呈现降低的趋势。HLC—L 模式下的 WUE 比 HLC—M 和 HLC—H 模式分别高 2.10%和 5.00%,而  $WUE_{i+p}$ 则比 HLC—M 和 HLC—H 高 3.00%和 5.56%,说明灌水量增加,会降低 WUE 和(灌溉水+降水)水分利用效率  $WUE_{i+p}$ ,说明适度的水分亏缺可以减少冬小麦奢侈水分浪费,从而相应提高水分利用效率。

对不同生育阶段耗水量与产量的相关性分析表明,产量与播种—返青期耗水量( $R^2 = 0.88, P < 0.05$ )、拔节—孕穗期耗水量( $R^2 = 0.60, P < 0.05$ )、开花—成熟期耗水量( $R^2 = 0.90, P < 0.05$ )均呈显著正相关。

表 4 不同栽培处理下冬小麦产量构成要素及水分利用效率

处理	成穗数/ ( $10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	产量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	WUE/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	WUE <sub>I+P</sub> / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
TC	556.67b	33.60b	43.16a	6686.23c	1.30c	1.61d
RCH	544.00b	35.40a	43.69a	6437.38d	1.31c	1.55e
RCM	530.00b	35.60a	43.47a	6399.14d	1.32c	1.61d
RCL	486.67b	32.00b	43.35a	6277.85d	1.32c	1.66d
HLC-H	778.13a	35.60a	43.23a	8199.11a	1.40b	1.98c
HLC-M	729.58a	35.70a	42.29a	8058.68a	1.44ab	2.03b
HLC-L	701.88a	37.00a	42.22a	7908.74b	1.47a	2.09a

### 3 讨论

冬小麦整个生育期的水分来源主要由降雨、灌溉水、土壤储存水 3 部分组成,其中土壤储存水受降雨和灌溉水等的影响较大。已有研究<sup>[14-16]</sup>表明,冬小麦整个生育季 0—40 cm 土层土壤含水率变化剧烈,灌溉和降雨能显著增加 0—40 cm 土层土壤含水率,40—120 cm 土层土壤含水率变化相对稳定,是冬小麦稳定的吸水利用层,120 cm 土层以下土壤含水率变化不显著。本研究中 0—100 cm 土层土壤含水率变化差异较大,100—150 cm 土壤含水率差异小。在冬小麦返青期,3 种栽培方式土壤含水率变化趋势一致且无明显差异;冬小麦返青期后,HLC 栽培方式下土壤含水率显著低于 RC 和 TC 2 种栽培方式,原因可能是返青期前冬小麦麦苗矮小,生长速度缓慢,大部分土地处于裸露状态,土壤蒸发处于主导地位,随着生育期后移至返青期,作物生长迅速,麦苗在地表覆盖度渐长,植株蒸腾占据主导地位,HLC 处理下冬小麦群体种植密度较大,耗水量也相应增大<sup>[17]</sup>。

本研究表明,栽培方式和灌水量均对冬小麦耗水量具有显著影响。随着灌水量增加,冬小麦的总耗水量以及对灌溉水利用的比例在增加,同时降低了冬小麦对降雨和土壤储水的利用比例,这与黄玲等<sup>[18]</sup>的研究结果相一致。在低水处理条件下,表层土壤水分不足,冬小麦根系为获取充足的土壤水分则势必需向深层土壤扎根<sup>[19]</sup>。相同水分处理下,与 TC 和 RC 栽培方式相比,HLC 栽培方式在冬小麦各个生育阶段的耗水量和全生育期总耗水量均显著高于 RC 和 TC 栽培方式,原因可能是:一方面为 HLC 栽培方式下的地表呈现波浪形结构,增大了太阳辐射蒸发面,使得土壤蒸发较强<sup>[20]</sup>;另一方面可能为 HLC 栽培方式下群体密度显著高于 RC 和 TC 栽培方式,冬小麦蒸腾耗水高于 TC 和 RC 栽培方式,故 HLC 栽培方式下冬小麦群体耗水量高于 TC 和 RC 栽培方式<sup>[21]</sup>。

相关性分析表明,冬小麦产量和耗水量呈极显著

正相关( $R^2=0.86, P<0.01$ )。冬小麦产量构成 3 个要素(成穗数,穗粒数,千粒重)中成穗数和穗粒数贡献最大。本研究中不同栽培方式间产量差异主要是成穗数所致,HLC 栽培方式有利于群体发育,从而增加产量<sup>[22-23]</sup>。WUE 受降雨、灌溉、栽培种植方式等多因素的影响<sup>[24]</sup>,其中不同栽培种植方式下的 WUE 差异显著<sup>[25]</sup>。许多研究<sup>[3,5-8]</sup>表明,RC 较 TC 栽培方式相比能够显著节水并且提高产量和水分利用效率,但本研究结果表明,RC 栽培方式下冬小麦产量明显低于 TC 栽培方式,水分利用效率没有明显差异,原因主要是由垄作规格差异导致,前人设置垄宽为 75 cm,垄上种 3 行小麦<sup>[26]</sup>,而本研究中相同垄宽上只种植 2 行小麦,导致亩穗数减少,从而 RC 栽培方式下产量和耗水量都低于 TC 栽培方式,因而本研究中 RC 栽培方式较 TC 相比水分利用效率并未提升。本研究表明,与 RC 和 TC 栽培方式相比,HLC 栽培方式下冬小麦产量提高 22.63%~27.37%,同时水分利用效率提高 7.69%~11.36%,主要原因是 HLC 栽培方式下群体种植密度增大,高畦通过低畦水分侧渗的地表结构促进冬小麦根系生长,从而提高冬小麦对降雨、灌溉水及土壤储存水的利用率。随着灌水量增加,产量呈现增加的趋势,而水分利用效率呈降低的趋势。存在这一趋势的原因主要是随灌水量增加,储存在土壤中的灌溉水相应增加,根系可获得水量增加,导致奢侈蒸腾耗水也相应提升<sup>[27]</sup>。总体来说,与 TC 和 RC 相比,无论是从产量还是水分利用效率来看,HLC 栽培方式都更具优势。然而,本研究试验仅 1 年,试验年份属于降水较丰沛的年份,因此需要继续开展该项研究工作,考察不同栽培方式与灌溉模式在其他降水条件下的表现,以对不同栽培模式的作用效果进行更为客观、全面的评价,从而筛选确定试验所在地区较为适宜的高产优质冬小麦栽培模式。

### 4 结论

(1)冬小麦返青期—成熟期 0—100 cm 土层土壤

含水量受降雨、灌水等因素影响较大;导致各栽培方式下冬小麦耗水差异性的主要原因是土壤结构与冬小麦群体种植密度不同。

(2)相同栽培方式下,冬小麦对灌溉水的利用率随着灌水量的增加而提高,而对土壤储水利用率则随着灌水量的增加而降低:相比 RCL 栽培方式,RCH 和 RCM 栽培方式下的冬小麦灌溉水利用率分别提升 10.09% 和 20.86%,土壤储水利用率分别降低 35.17% 和 12.49%。相同灌水处理下,HLC 栽培方式下的冬小麦土壤储水利用率显著高于 TC 和 RC 种植方式,分别提升 65.76% 和 116.26%。

(3)HLC 栽培方式下冬小麦产量显著高于 TC 和 RCH,分别提升 22.63% 和 27.37%;与 TC 和 RC 相比,HLC 栽培方式更有利于冬小麦群体发育,增强冬小麦对降雨、灌水和土壤水的利用程度,从而显著提升冬小麦水分利用效率。

#### 参考文献:

- [1] 周宝元.黄淮海冬小麦—夏玉米资源优化配置及其节水高产技术模式研究[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [2] 马文军,程琴娟,宇振荣.试验站和农户管理水平下冬小麦水分利用效率比较[J].资源科学,2010,32(10):1896-1901.
- [3] 张雪玲.沟垄集雨种植和灌溉对关中灌区小麦产量及水肥利用效率的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [4] 满建国,王东,于振文,等.不同带长微喷带灌溉对土壤水分分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J].应用生态学报,2013,24(8):2186-2196.
- [5] Wang F H, Wang X Q, Sayre K. Comparison of conventional, flood irrigated, flat planting with furrow irrigated, raised bed planting for winter wheat in China [J]. Field Crops Research,2004,87(1):35-42.
- [6] 汪顺生,高传昌,王兴,等.不同灌溉方式下冬小麦耗水规律及产量的试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(4):11-14.
- [7] 高传昌,李兴敏,汪顺生.垄作小麦产量及水分生产效率的试验研究[J].灌溉排水学报,2011,30(4):10-12.
- [8] 马丽,刘天学,韩德果,等.垄作对冬小麦、夏玉米产量和水分利用效率的影响[J].核农学报,2010,24(5):1062-1067.
- [9] 武利峰,吴艳芳,杨婕,等.一种两高四低高低畦种植施肥播种一体机:中国,CN109716888A[P].2019-05-07.
- [10] 耿爱民,武利峰,刘渤,等.一种小麦高低畦种植方法:中国,CN104718937A[P].2015-06-24.
- [11] 吴辰,王国庆,郝振纯,等.长武塬区实际蒸散发变化及驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):37-42.
- [12] 宜丽宏,王丽,张孟妮,等.不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(10):14-19.
- [13] 杨林林.麦田土壤水分运移与有效性评价[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [14] Shiva K J.灌溉模式对冬小麦生长发育及水分利用的影响[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [15] Zhao X, Li F D, Ai Z P, et al. Stable isotope evidences for identifying crop water uptake in a typical winter wheat-summer maize rotation field in the North China Plain [J]. Science of The Total Environment,2018,618:121-131.
- [16] 杨文稼,王仕稳,李雨霖,等.半干旱地区补充灌溉对冬小麦根系及耗水特征的影响[J].干旱区研究,2018,35(4):920-928.
- [17] 王松林,史尚,王兴,等.不同种植模式冬小麦耗水特性及产量试验研究[J].中国农村水利水电,2014(5):49-52.
- [18] 黄玲,杨文平,胡喜巧,等.水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):168-174.
- [19] 张伟,李鲁华,吕新.不同灌水量对滴灌春小麦根系时空分布、水分利用率及产量的影响[J].西北农业学报,2016,25(3):361-371.
- [20] 董浩,陈雨海,周勋波.灌溉和种植方式对冬小麦耗水特性及干物质生产的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1871-1878.
- [21] 刘战东,肖俊夫,于景春,等.春玉米品种和种植密度对植株性状和耗水特性的影响[J].农业工程学报,2012,28(11):125-131.
- [22] 葛林,梁威威,王志强,等.拔节期补灌对豫中冬小麦籽粒灌浆和产量的影响[J].河南农业科学,2011,40(3):29-31.
- [23] 汪顺生,刘慧,高传昌,等.不同灌溉方式下冬小麦穗部性状与产量关系的试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(3):86-89.
- [24] 郑洪兵,刘武仁,罗洋,等.耕作方式对农田土壤水分变化特征及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):264-270.
- [25] Wu Y, Jia Z K, Ren X L, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China [J]. Agricultural Water Management, 2015,158:1-9.
- [26] 王法宏,杨洪宾,徐成忠,等.垄作栽培对小麦植株形态和产量性状的影响[J].作物学报,2007,33(6):1038-1040.
- [27] 齐林,陈雨海,周勋波,等.冬小麦种植模式对水分利用效率的影响[J].生态学报,2011,31(7):1888-1895.