

深层灌水对冬小麦耗水特性及水分利用效率的影响

黄洁¹,孙西欢^{1,2},马娟娟¹,郭向红¹,狄楠¹

(1.太原理工大学水利科学与工程学院,山西太原 030024;
2.山西水利职业技术学院,山西运城 044004)

摘要:以高产中晚熟冬小麦品种良星 99 为材料,在运城市盐湖区山西水利职业技术学院实训基地进行田间试验,研究了深层灌水对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响。结果表明:整个生育期,深层灌水处理根区 20~160 cm 土层土壤水分动态变化比地表灌处理明显;T1(地表灌水)处理总耗水量最大,显著高于 T2(湿润层深度为根系 60%)、T3(湿润层深度为根系 75%)和 T4(湿润层深度为根系 90%),深层灌水增加了降雨和灌溉水的消耗,降低了土壤贮水的消耗;T2 和 T3 处理间无显著差异,T3 在抽穗至灌浆期末、灌浆至成熟期的耗水量和耗水模系数均较大;不同湿润层深度条件下,T1 处理水分利用效率和产量最低,随湿润层深度增加,其他处理水分利用效率呈先增加后降低的趋势。湿润层深度为 150 mm 和 188 mm 的 T2 和 T3 产量、水分利用效率和灌溉水利用效率表现最好,T1 处理最低。T3 为本试验条件下高产节水的最佳处理。

关键词: 深层灌水;冬小麦;耗水特性;水分利用效率
中图分类号: S275.4 **文献标志码:** A

Effects of deep irrigation on water consumption and water use efficiency of winter wheat

HUANG Jie¹, SUN Xi-huan^{1,2}, MA Juan-juan¹, GUO Xiang-hong¹, DI Nan¹

(1. College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2. Shanxi Conservancy Technical College, Yuncheng, Shanxi 044004, China)

Abstract: A field experiment was conducted on, Liangxing 99, a mid-late maturing winter wheat with high yield in Shanxi Conservancy Technical College training base in Yanhu District, Yuncheng City of Shanxi, to explore the effects of deep irrigation on water consumption and water use efficiency of winter wheat. The results showed the soil water dynamic changes within 20~160 cm depth of root zone was more than that under the surface irrigation treatment in the whole growth period. The total water consumption under T1 (surface irrigation treatment) was significantly higher than that under T2 (depth of wetting layer is 60%), T3 (depth of wetting layer is 75%) and T4 (depth of wetting layer is 90%). Deep irrigation increased the consumption of rainfall and irrigation, and reduced the consumption of soil water storage. There was no significant difference between T2 and T3. The water consumption and water consumption coefficient of T3 in the stage from heading to filling and the stage from grain filling to maturity were larger. Under different irrigation conditions, the efficiency of water use and yield under T1 treatment was the lowest. With the increase of wetting layer depth, efficiency of water use under other treatments increased and then decreased. The production, efficiency of water use and efficiency of irrigation water use under T2 and T3 were the best at 150 mm and 188 mm depth of wetting layer. As far as high yield and water-saving were concerned. T3 was the optimal under the condition of this experiment.

Keywords: deep irrigation; winter wheat; water consumption characteristics; water use efficiency

收稿日期:2016-01-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51109154,51579168);山西省科技攻关资助项目(20140311016-6);山西省水利厅科技项目;山西省高等学校创新人才支持计划
作者简介:黄洁(1988—),女,硕士研究生,研究方向为节水灌溉研究。E-mail:842299387@qq.com。
通信作者:孙西欢(1960—),男,教授,博导,主要从事节水灌溉与土壤动力学研究。E-mail:sunxihuan@tyut.edu.cn。

华北平原冬麦区是我国小麦主产区,水分短缺是限制该区小麦高产的主要因子^[1],受季风气候影响,该地区 70%以上的降水集中在 7—9 月,小麦生长期间降水只能满足其需要的 25%~40%,故而灌溉是提高小麦产量的主要措施^[2]。传统高产小麦栽培通常采用平作或大水漫灌的栽培方式,不仅灌水多、耗水量大、水分利用效率低^[3],而且还会导致土壤板结及土壤结构的破坏^[4]。如何合理利用有限的水资源减少灌溉用水、提高水分利用效率是冬小麦生产迫切需要解决的问题。华北平原丘陵地区属于旱半干旱气候,作物对深层土壤水分的吸收利用成为影响作物产量的关键因素^[5]。

深层灌水是一种中深层的立体灌溉方法。通过深层灌溉,作物调整根系的生长和分布来适应土壤环境和水分养分的空间差异,进而影响作物对土壤水资源的吸收利用。作物对土壤水的吸收利用,不仅受根系吸水水力特性影响,根系大小和所占的空间对土壤水对作物的有效性起决定性作用^[6-7]。特别是随着水资源短缺的加剧,提高作物根系获得土壤水分能力以提高作物抗旱性显得尤为重要^[8]。张喜英^[9]认为通过耕作、施肥、灌水可促使根系深扎,增加根系对土壤贮水的有效利用;马瑞昆等^[10]研究表明深层地下供水可控制浅土层次生根发育,促进初生根发育;Kirkegaard 等^[11]发现在澳大利亚旱作

条件下冬小麦 1.35~1.85 m 土层中多吸收 10.5 mm 的水分,就能增产 0.62 t·hm⁻²。康利允等^[12]研究发现上干下湿水分处理产量和水分利用效率分别增加 10.0%和 47.4%。以上这些研究结果为旱地农业生产和用水管理提供了一定理论和实践依据。过去有关水分对作物耗水规律及水分利用效率影响的研究,大多局限于灌水定额、灌水次数和灌水时期^[13],而关于灌水深度,由于试验条件限制和测根等技术存在的困难而研究较少。本研究针对冬小麦根系分布特点,采用土柱管栽技术,在一定供水量情况下探索不同灌水深度对冬小麦耗水特性及水分利用效率的影响,为华北地区作物合理灌溉,提高土壤贮水利用率,变被动抗旱为主动抗旱提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验田概况

试验于 2014—2015 年在山西省运城市盐湖区山西水利职业技术学院实训基地大田进行。该实训基地位于北纬 34°48′27″,东经 110°41′23″,平均海拔 370 m。多年平均降雨量 559.3 mm,主要集中在 7—9 月份,年平均日照时数 2 247.4 h,年平均气温 13.6℃。试验区土壤属于中壤土,0~300 cm 土壤养分含量见表 1。

表 1 试验地土壤基础理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土层 Soil layer /cm	pH	全盐量 Total salt /%	有效氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	有效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	容重 γ /(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field moisture capacity/%
0~20	8.88	0.7568	62.90	45.79	206.5	1.150	0.769	19.43	20.20	1.4862	37.49
20~50	8.95	0.1232	25.16	4.94	168.0	0.359	0.182	17.92	10.00	1.6121	35.18
50~90	8.36	0.1408	28.76	8.36	192.5	0.413	0.449	17.92	5.69	1.6242	37.01
90~160	8.31	0.1690	16.18	8.36	206.5	0.665	0.365	19.43	6.47	1.6300	38.61
160~210	8.34	0.1443	10.78	6.27	199.5	0.503	0.373	19.43	3.53	1.5372	43.18
210~300	8.60	0.1021	7.19	7.41	248.5	1.042	0.072	17.92	2.94	1.5145	40.34

注:表中田间持水量为土壤体积含水率。
Note:The soil moisture content in the table is the volumetric water content of the soil.

1.2 试验设计

试验田面积 21 m×2.5 m,土柱采用完全随机耕作方式排列为 3 列,行距 80 cm,行与行之间土壤加种一行小麦作为保护行(图 1)。为方便试验操作,在试验小区和大田之间设两条人行道,并安装轨道车。土柱(PVC 管)外径 20 cm,内径 18.6 cm。土柱装土前先将试验埋坑土壤分层挖出,混合均匀后每

5 cm 一层依次装入土柱压实,最后植入大田,最大埋入深度为 3 m。试验共设置四个灌水深度,即:地表灌溉、湿润层深度为根系分布的 60%、湿润层深度为根系分布的 75%、湿润层深度为根系分布的 90%,分别用 T1、T2、T3、T4 表示,每个生育期(越冬期、返青拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期)分别设 4 个重复,共 80 根土柱。

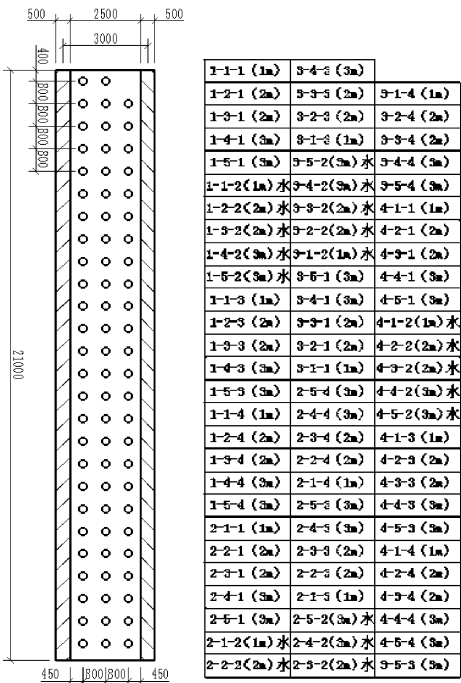


图 1 土柱布置图

Fig.1 Soil column arrangement

表 2 冬小麦生育期灌水时间、灌水孔布置、计划灌水深度及灌溉定额

Table 2 Irrigation Time,Irrigation Hole Setting,Schemed Irrigation Depth and Irrigation quota of winter wheat during the growth period

生育期 Growth period	灌水日期 Irrigation time	处理 Treatment	灌水孔 Irrigation hole depth /cm	平均最大根深 Average maximum root's depth /cm	计划灌水深度 Irrigation scheme depth/cm	生育期灌溉定额 Irrigation quota of growth stage /($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)
越冬水 Wintering water	12 – 23	T1、T2、T3、T4	0	70	—	750
返青水 Revival water	03 – 07	T1	0	120	—	675
		T2	0、30、60	120	72	
		T3	0、30、50、80	120	90	
		T4	0、30、50、70、90	120	108	
抽穗水 Heading water	04 – 11	T1	0	178	—	675
		T2	0、30、60、90	192	115	
		T3	0、30、50、80、120	197	147	
		T4	0、30、50、70、90、120、150	200	180	
灌浆水 Filling water	05 – 04	T1	0	219	—	675
		T2	0、30、60、90、120	250	150	
		T3	0、30、50、80、120、150	250	188	
		T4	0、30、50、70、90、120、150、180	258	221	
总灌溉定额/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) Tall irrigation quota						2775

1.3 测定项目与方法

1.3.1 基本测定项目 土壤基本性质按常规方法测定^[15]。土壤含水量采用 Diviner2000 土壤水分廓线仪定期测定,测定深度为 0~160 cm,每隔一周测一次。生育期做剖根实验时分层取土,10 cm 为一

冬小麦于 2014 年 10 月 12 日播种,品种为国审麦良星 99,属半冬性中晚熟品种,生育期 240 天左右。三叶期每根土柱定苗 3 棵,其他管理措施同当地大田管理,次年 6 月 1 日收割。气象资料由实训基地气象站获得,生育期总降雨量为 177.8 mm。

每次灌水前根据含水量和设计水分要求,对不同深度的灌水孔通过点滴管加入所需水分。试验期间共灌水四次(表 2),由于越冬根系深度比较浅,故越冬水没有分层进行处理。灌水定额根据当地大田灌水定额制定,均为 2 775 m³·hm⁻²,每个灌水深度的灌水量由灌水定额计算公式确定^[14],计算公式为:

M = 10ρ_b H(β_i - β_j)

其中,M 为灌水量(mm),H 为土壤计划湿润层的深度(cm),试验由灌水孔之间的距离确定,ρ_b 为计划湿润土层的土壤容重(g·cm⁻³),β_i 为目标含水量(田持的 85%),β_j 为自然含水量,即灌溉前土壤含水量。灌水量用量筒计量。

层,取 0~300 cm 土层土样,置于铝盒中,采用烘干法测定土壤含水量。最后对两种测量方法进行分析,得出换算系数 k≈1.27=θ₁(土壤水分廓线仪法)/θ₂(烘干法)。小麦成熟后按柱收获,剪取地上部分后在室内测定每柱分蘖数、穗长、穗粒数、千粒

重、产量等指标。

1.3.2 有效降雨量的计算 由公式^[16]:

$$I_c = (0.256LAI - 0.217)[1 - \exp(\frac{-P}{0.256LAI - 0.217})] + \alpha P$$

计算得出。其中, I_c 为冠层截留量(mm); α 为降雨蒸发率, 取 0.008; P 为次降雨量(mm); LAI 为冬小麦叶面积指数, 从返青期开始每周用直尺测量土柱所有植株叶子的长和宽, 计算叶面积 $LA = \sum(\text{叶长} \times \text{叶宽})/1.2$, 然后求得叶面积指数 $LAI = LA/S$ (S 为试验筒底面积)。

1.3.3 耗水量的计算 采用测定土壤含水率计算作物耗水量时, 耗水量的计算公式为^[17]:

$$ET_{1-2} = \sum_{i=1}^n H_i(\theta_{i1} - \theta_{i2}) + I + P_0 + K$$

式中, ET_{1-2} 为阶段耗水量(mm); i 为土层编号; n 为总土层数, 本试验 $n = 30$; H_i 为第 i 层土壤厚度(cm), 本试验计算深度为 300 cm; θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末的体积含水率, 以百分数计; I 为时段内的灌水量(mm); P_0 为有效降水量(mm); K 为时段内的地下水补给量(mm), 由于试验土柱的下端有塑料布封口, 地下水补给量可视为 0, 故 K 值可以忽略不计。

日耗水量 = 各生育阶段土柱耗水量/生育阶段天数

耗水模系数 = 各生育阶段土柱耗水量/麦田总耗水量

1.3.4 水分利用效率和灌溉水利用效率

水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)^[18] = 籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/小麦生育期耗水量(mm);

灌溉水利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)^[18] = 籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)/灌水量(mm)。

1.4 数据处理

试验数据使用 Microsoft Excel 和 SPSS 21 软件进行处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌水深度条件下根区各土层土壤水分动态变化

根据土壤剖面自上而下的分层情况将 0~160 cm 的土层分成四部分来分析, 即 0~20、20~50、50~90、90~160 cm。然后定期监测冬小麦返青期~成熟期根区不同深度土壤体积率的动态变化(图 2), 分析根区土壤水分运移与分布规律, 进而了解吸水根系对不同土层深度水分的吸收情况。

由图 2(a)可以看出, 在 0~20 cm 土层范围内, 四个处理土壤水分波动都很大, 但大体上随灌水深度增加呈减小趋势, 各处理表层 0~20 cm 含水率比较: $T1 > T2 > T3 > T4$ 。3 月 29 日稍有增加是之前几天持续降雨的缘故, 而 4 月 9 日和 5 月 5 日的突然增大是灌水的原因。

图 2(b)、图 2(c)、图 2(d)和图 2(e)分别是 20~50、50~90、90~130 cm 和 130~160 cm 范围内根区土壤水分动态变化曲线。由图可知, 地表灌 $T1$ 随土层深度的增加, 曲线波动越不明显, 尤其是 90 cm 以下土层, 曲线几乎呈直线, 说明地表灌水对土壤水分的影响随深度增加逐渐减小, 90 cm 以下土层, 地表灌水对其的影响已微乎其微。4 月 20 日以后 $T1$ 处理 90 cm 以下土层含水率值几乎没有明显变化, 说明 90 cm 以下土层存在小麦根系, 且在生育后期, 这一部分根系对土壤水的利用很少; 而处理 ($T2$ 、 $T3$ 、 $T4$) 由于深层灌水的原因, 各处理在 3 月 14 日、4 月 9 日、5 月 5 日含水率值突然增加, 而且灌水过后, $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 土层含水率都有降低趋势, 但是整个生育期各土层平均含水率值均比 $T1$ 大。20~50 cm 土层, 灌水深度最大的处理 $T4$ 在 4 月 20 日左右降幅较其他处理明显, 说明 $T4$ 在该深度处的吸水根系比较旺盛, 4 月 28 日各处理含水率稍有增加是由于连续降雨的原因, 生育后期含水率大小比较: $T3 > T2 > T4 > T1$; 50~90 cm 土层, 4 月 9 日以后, 各处理的含水率值都持续降低, 到 4 月 28 日降到最低值, 该点含水率值大小比较: $T1 \approx T4 < T3 < T2$, 4 月 28 日各处理的含水率值并没升高, 说明前几天降雨没有影响到 50~90 cm 土层。灌浆水后, 各处理含水率持续减小, 下降速度比较: $T3 > T4 > T2 > T1$; 90~130 cm 土层, 从图 d 可以看出, $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 土层含水率在 4 月 28 日依然有所降低, 但是不如前几层那么明显。含水率降幅最明显出现在 5 月 30 日(成熟期), 在该处, $T2$ 和 $T3$ 的含水率甚至比 $T1$ 还要低, 说明深层灌的冬小麦根系依然能从 90~130 cm 深的土层中吸收大量的水分供植株籽粒成熟所需, 而且除了灌溉水, 植株在该生育期还要利用一部分土壤水; 130~160 cm 土层, 冬小麦在该范围内的土壤水分已接近田间持水量, 不管是地表灌水还是深层灌水对该部分的土壤水分影响都不大。从图 e 中可以看出, 相比地表灌, 深层灌波动还是比较明显的, 尤其是在生育后期含水率波动依然很明显, 这就足以说明深层灌水可以使冬小麦更深层的根区持续保持活力直至收获。

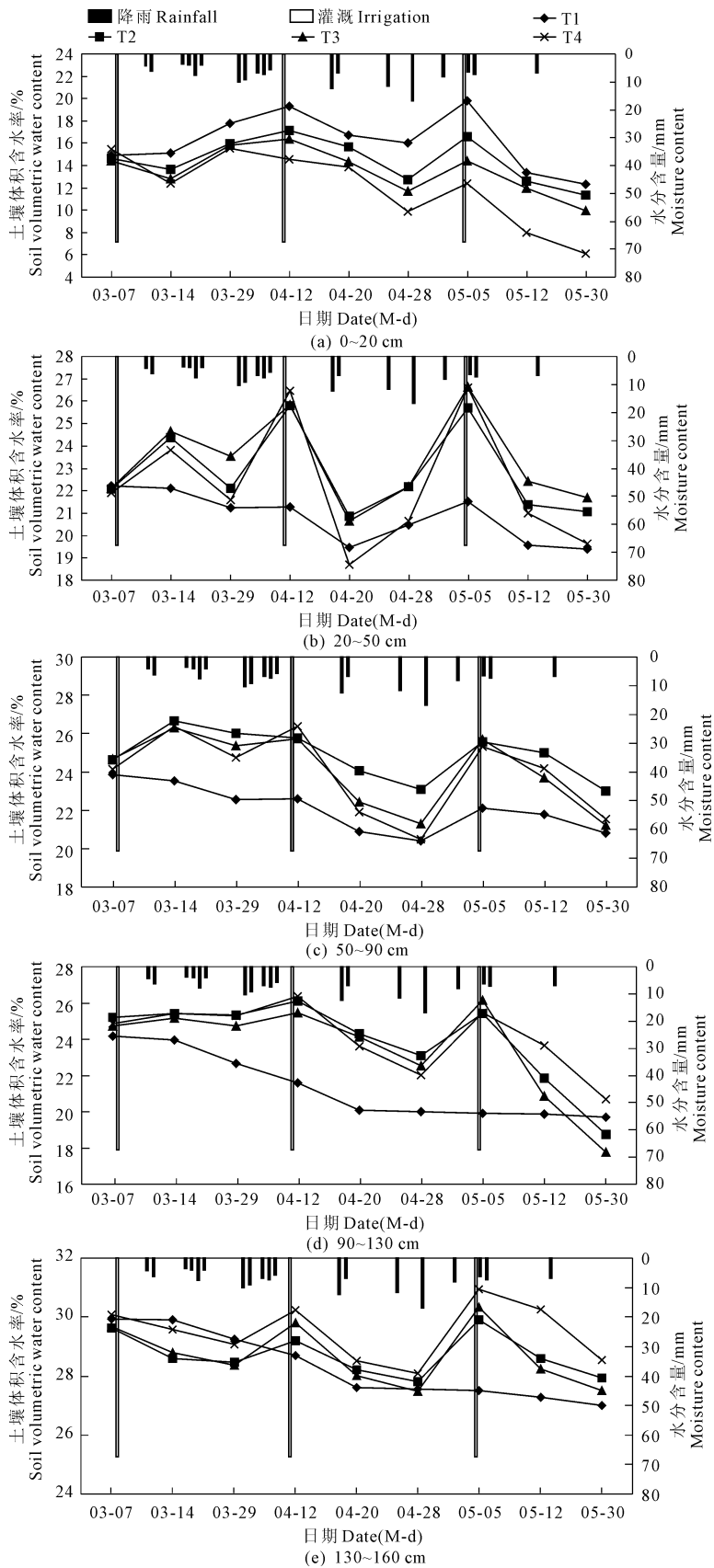


图 2 根区各土层土壤体积含水率动态变化

Fig.2 Dynamic Change of soil volumetric moisture within the root zone

2.2 生育期阶段耗水量、耗水模系数和日耗水量的差异

如表 3 所示,在不同灌水深度条件下,冬小麦阶段耗水参数表现有所不同。从整个生育期来看,各处理的阶段耗水量(WCA)和耗水模系数(WCP)都表现为:播种至拔节期末>拔节至抽穗期末>抽穗至灌浆期末>灌浆至成熟期末;日耗水量(WCD)都表现为:拔节至抽穗期末>抽穗至灌浆期末>灌浆至成熟期末>播种至拔节期末。说明冬小麦生育期耗水主要集中在播种至拔节期末阶段,耗水量占冬小麦全生育期耗水量的 47.48%~53.26%,但是日耗水量在此阶段最小。

从各生育阶段来看,播种至拔节期末: $T1_{WCA} > T4_{WCA} > T3_{WCA} > T2_{WCA}$, $T1_{WCP} > T4_{WCP} > T3_{WCP} > T2_{WCP}$, $T1_{WCD} > T4_{WCD} > T3_{WCD} > T2_{WCD}$;拔节至抽穗期末: $T4_{WCA} > T1_{WCA} > T3_{WCA} > T2_{WCA}$, $T4_{WCP} > T2_{WCP} >$

$T3_{WCP} > T1_{WCP}$, $T4_{WCD} > T1_{WCD} > T3_{WCD} > T2_{WCD}$;抽穗至灌浆期末: $T3_{WCA} > T2_{WCA} > T1_{WCA} > T4_{WCA}$, $T3_{WCP} > T2_{WCP} > T1_{WCP} > T4_{WCP}$, $T3_{WCD} > T2_{WCD} > T1_{WCD} > T4_{WCD}$;灌浆至成熟期: $T3_{WCA} > T2_{WCA} > T4_{WCA} > T1_{WCA}$, $T3_{WCP} > T2_{WCP} > T4_{WCP} > T1_{WCP}$, $T3_{WCD} > T2_{WCD} > T4_{WCD} > T1_{WCD}$ 。可以看出,处理间阶段耗水量、日耗水量的差异主要表现在拔节至抽穗期末和抽穗至灌浆期末,T4 在抽穗至灌浆期的阶段耗水量突然减小,与冬小麦生育后期根区 90 cm 以下土壤水分的利用率的减小有关,进而影响到后期的籽粒灌浆。由以上比较可知,T2、T3 在灌浆至成熟期仍能保持较高的阶段耗水量(40.08 mm、42.11 mm)和日耗水量(2.67 mm、2.81 mm),而地面灌的阶段耗水量和日耗水量仅有 21.67 mm 和 1.44 mm,结合图 1 的分析,说明深层灌的小麦在生育后期各部分器官仍能保持很大的活力,能充分供应籽粒成长所需的水分。

表 3 不同处理冬小麦生育期耗水量、耗水模系数和日耗水量

Table 3 Water consumption amount, water consumption percentage and water consumption per day in different growth period												
处理 Treatment	播种~拔节期末 Sowing~jointing			拔节~抽穗期末 Jointing~heading			抽穗~灌浆期末 Heading~filling			灌浆~成熟期 Filling~maturing		
	WCA/mm	WCP/%	WCD/mm	WCA/mm	WCP/%	WCD/mm	WCA/mm	WCP/%	WCD/mm	WCA/mm	WCP/%	WCD/mm
T1	296.21a	53.26a	1.60a	155.30b	27.93c	10.35b	82.96b	14.92b	5.53b	21.67c	3.90c	1.44c
T2	247.68c	47.48c	1.34c	146.51c	28.08b	9.77c	87.42a	16.76a	5.83a	40.08a	7.68a	2.67a
T3	258.10c	47.49c	1.40c	152.42b	28.04b	10.16b	90.89a	16.72a	6.06a	42.11a	7.75a	2.81a
T4	275.16b	51.73b	1.49b	165.44a	31.11a	11.03a	59.12c	11.12c	3.94c	32.15b	6.04b	2.14b

注:WCA 为阶段耗水量;WCP 为耗水模系数;WCD 为日耗水量。同列不同字母表示相同项目不同处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。
Note: WCA: Water consumption amount;WCP: Water consumption percentage;WCD: Water consumption per day. Different letters in same column mean significant difference of the same item between different treatments at 0.05 levels. The same below.

2.3 全生育期的总耗水量

表 4 为不同湿润深度处理的总耗水量以及总耗水量的组成部分(有效降雨量、不同处理的总灌水量和土壤供水量)所占的比例。可知总耗水量: $T1_{ET} > T3_{ET} > T4_{ET} > T2_{ET}$,且差异显著,T2、T3 和 T4 处理的总耗水量分别比地表灌水 T1 处理减少了 6.19%、2.27%和 4.36%;有效降雨量比较: $T1_p > T2_p > T3_p > T4_p$,占总耗水量比例差异不显著,T2 处理最大,为 30.2%;各处理总灌水量一定: $T1_l = T2_l = T3_l = T4_l$,占总耗水量的比例为 $T1 < T3 < T4 < T2$,说明湿润层深度为根系 60%的处理 T2 对灌溉水的利用最高,T4 次之,地表灌最小;土壤供水量比较: $T1_{\Delta S} > T3_{\Delta S} > T4_{\Delta S} > T2_{\Delta S}$,所占比例 $T1 > T3 > T4 > T2$ 。以上比较说明:增加灌水深度显著促进了冬小麦对雨水和灌溉水的利用,降低了其对土壤贮水的利用;其中土壤贮水消耗量占总耗水量的比例变化幅度较大,CV 为 10.20%,有效降雨量和灌水量占总耗水

量的比例变化幅度分别为 2.35%和 2.75%,表明土壤贮水消耗量有较大的调控范围,降低冬小麦主要生育时期的各湿润层深度的灌水量,能提高土壤贮水利用比例,达到节约灌溉水的目的。

2.4 水分利用效率

由表 5 可以看出,地表灌 T1 处理耗水量最大,但是水分利用效率和籽粒产量最低,说明在冬小麦地表保持充足的水分条件是没有必要的,过多的水分反而会容易造成作物株体营养生长过剩;随着灌水深度的增加,其他处理水分利用效率表现为先增加后降低的趋势。全生育期灌水深度小于 188 cm 时,水分利用效率: $T1 < T2 < T3$;灌水深度由 188 cm 增加到 221 cm 时,水分利用效率降低。最大灌水深度为 150 cm 和 188 cm 的 T1 和 T3 处理产量最高,水分利用效率也最大,两处理间无显著差异。T2、T3、T4 处理的水分利用效率分别比地表灌 T1 提高了 36.67%、37.86%和 26.37%,产量分别提高了

28.22%、34.74%和 20.87%;各处理总灌水量一定,均为 277.4 mm,灌溉水利用效率比较:T3 > T2 > T4 > T1,除了 T3 和 T2,其他处理间差异显著。表明 T3 是本试验条件下高产节水的最佳灌水深度处理,其

籽粒产量、水分利用效率、灌溉水利用效率分别为 14 295.93、26.30、51.54 kg·hm⁻²·mm⁻¹。可见深层灌水可以提高作物的水分利用效率,但并不是湿润层深度越大越好。

表 4 不同灌水深度对冬小麦整个生育期总耗水量及其组成因素的影响

Table 4 Evapotranspiration (ET) and its components at different irrigation depth in the whole growth period of winter wheat									
处理 Treatment	总耗水量 ET/mm	有效降雨量 P		总灌水量 I		土壤供水量△S			
		数量 Amount /mm	比例 Ratio /%	数量 Amount /mm	比例 Ratio /%	播种前土壤有效 储水量/mm Soil effective water content before sowing	收获后土壤有效 储水量/mm Soil effective water content after harvest	△S /mm	比例 Ratio /%
T1	556.14a	161.91a	29.1a	277.4	49.9	847.97	731.14c	116.83a	21.0a
T2	521.70d	157.60a	30.2a	277.4	53.2	847.97	761.27a	86.70c	16.6c
T3	543.51b	155.33a	28.6a	277.4	51.0	847.97	737.19c	110.78a	20.4a
T4	531.87c	154.61a	29.1a	277.4	52.2	847.97	748.11b	99.86b	18.8b
CV/%	2.76	2.09	2.35	—	2.75	—	1.78	12.79	10.20

注:表中 CV 为变异系数。Note: In the table, CV is the coefficient of variation.

表 5 不同灌水深度对冬小麦水分利用效率的影响

Table 5 Effects of different irrigation depth on water use efficiency of winter wheat						
处理 Treatment	最大灌水深度 Maximum of irrigation depth/cm	总灌水量 Total irrigation /mm	总耗水量 Total water consumption /mm	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
T1	地表	277.4	556.14a	10610.14c	19.08c	38.25c
T2	150	277.4	521.70d	13604.31a	26.08a	49.04a
T3	188	277.4	543.51b	14295.93a	26.30a	51.54a
T4	221	277.4	531.87c	12823.99b	24.11b	46.23b

3 讨 论

不同的灌溉方式使各土层土壤的含水量分布状态呈现出差异性。冬小麦深层灌水处理根区 20 ~ 160 cm 土层土壤水分动态变化比地表灌处理明显,尤其是 90 ~ 130 cm 和 130 ~ 160 cm 土层。已有很多研究表明作物根系有趋水、趋肥的特性,苗果园^[5]等的研究表明超深层(150 ~ 250 cm)施肥对根系有一定的诱导作用;康利允^[12]的研究指出 0 ~ 40 cm 上干下湿水分处理可使冬小麦下层根系生物量、产量及水分利用效率显著增加,此结论与本文相吻合,只是本文的研究深度为 3 m;易立攀等^[19]的测墒补灌试验表明 0 ~ 40 cm 土层测墒补灌可显著提高土壤水的利用效率,与本文结论不太一致,本文研究表明地表灌溉总耗水量显著高于深层灌水,且深层灌水增加了降雨和灌水的消耗量,降低了土壤贮水的消耗量,初步分析原因是由于计划湿润层的湿润程度及湿润深度的不同所导致。不同湿润层深度条件下,地表灌水分利用效率和产量最低,灌水深度为

150 mm 和 188 mm 的 T2 和 T3 产量、水分利用效率和灌溉水利用效率表现最好。随湿润层深度增加,水分利用效率呈先增加后降低的趋势。湿润层深度为根区 75% 为本试验条件下高产节水的最佳处理。冬小麦深层灌水是一种中深层的立体灌溉水分调控方式,湿润层深度作为其中重要的参数,将对灌溉制度的制定、灌水质量的评价起到关键作用。由于本试验仅分析了一个生育期内不同湿润层深度对冬小麦需水特性和水分利用效率的影响,关于其不同立地条件下的重现性和相关作物生长模型的建立还有待进一步的研究。

参 考 文 献:

[1] 张光辉,连英立,刘春华,等.华北平原水资源紧缺情势与因源[J].地球科学与环境学报,2011,33(2):172-176.
[2] 董宝娣,张正斌,刘孟雨,等.小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J].农业工程学报,2007,23(9):27-33.
[3] 周殿玺.小麦节水高产栽培技术[J].北京水利,1995,(3):27-29.

