

去电子水灌溉对冬小麦生长及其水分利用的影响

王艳会, 赵国庆, 王全九, 王力

引用本文:

王艳会, 赵国庆, 王全九, 等. 去电子水灌溉对冬小麦生长及其水分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 953-963.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1339>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

精准农业对华北平原冬小麦温室气体排放和产量的短期影响

卢闯, 王永生, 胡海棠, 董熙, 李存军

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1641-1648 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1381>

沼液灌溉对冬小麦-夏玉米轮作农田CO₂、N₂O排放规律的影响

王小非, 沈仕洲, 尹高飞, 闫建华, 杜会英, 张克强

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 783-792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1535>

降解地膜对南疆棉田土壤水热及棉花产量的影响

吴凤全, 林涛, 祖米来提·吐尔干, 邓方宁, 尔晨, 何文清, 汤秋香

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2793-2801 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0740>

沼液替代化肥对小麦-玉米轮作温室气体排放及温室效应的影响

尹高飞, 王小非, 沈仕洲, 杜会英, 巴士迪, 张克强

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1408-1419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0657>

模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响

杜锟, 李发东, 涂纯, 李兆

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 691-699 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1336>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王艳会, 赵国庆, 王全九, 等. 去电子水灌溉对冬小麦生长及其水分利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 953–963.

WANG Yan-hui, ZHAO Guo-qing, WANG Quan-jiu, et al. Effects of irrigation with de-electronic water on growth and water use of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 953–963.



开放科学 OSID

去电子水灌溉对冬小麦生长及其水分利用的影响

王艳会¹, 赵国庆¹, 王全九², 王力^{1*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要:为探究去电子水灌溉对冬小麦生长及其水分利用的影响,选取关中平原典型灌区为研究区开展大田试验。以冬小麦“小偃22号”为供试作物,设置不同的灌水类型(普通水与去电子水)和灌溉量水平(60、120、180 mm与240 mm),分阶段对冬小麦的生长指标与光合指标进行测定,分析冬小麦的耗水特性、土壤水分变化状况及水分利用效率。结果表明,同一灌溉量水平(180 mm)下,与普通水灌溉相比,去电子水灌溉的冬小麦生长速率更快,同时耗水量较高,其籽粒产量与水分利用效率亦显著提高了17.8%与15.1%;与0 mm灌溉相比,去电子水灌溉的冬小麦增产46.9%,高于普通水灌溉处理(24.7%)。去电子水不同灌溉量处理中,灌溉量为180 mm时冬小麦的籽粒产量与水分利用效率均最高。因此,可以将去电子水灌溉180 mm作为关中平原冬小麦高效用水和高产的较优灌溉方案。

关键词:冬小麦;去电子水;灌溉量;产量;水分利用效率

中图分类号:S27 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-0953-11 doi:10.11654/jaes.2019-1339

Effects of irrigation with de-electronic water on growth and water use of winter wheat

WANG Yan-hui¹, ZHAO Guo-qing¹, WANG Quan-jiu², WANG Li^{1*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To explore the effect of irrigation with de-electronic water on the growth and water use of winter wheat, a field experiment was carried out in Guanzhong Plain, a typical irrigation area. Winter wheat ‘Xiaoyan 22’ was used as the test crop. Different irrigation treatments (normal and de-electronic water) and irrigation amounts (60, 120, 180 mm, and 240 mm) were used. The growth and photosynthetic indexes of winter wheat were measured in different stages, and the water consumption of this crop, variation in soil moisture, and water use efficiency were analyzed. Compared to winter wheat irrigated with normal water, winter wheat irrigated with de-electronic water under the same irrigation amount (180 mm) had a higher growth rate and water consumption, its grain yield and water use efficiency increased significantly by 17.8% and 15.1%, respectively. Compared with zero irrigation, the yield of winter wheat increased by 46.9% under the de-electronic water irrigation treatment, which was higher than that under the normal water irrigation treatment (24.7%). Under different de-electronic water irrigation treatments, winter wheat had the highest grain yield and water use efficiency with an irrigation amount of 180 mm. Therefore, irrigation with 180 mm de-electronic water can be implemented as an improved irrigation scheme for efficient water use and high yield of winter wheat in the Guanzhong Plain.

Keywords: winter wheat; de-electronic water; irrigation volume; yield; water use efficiency

收稿日期: 2019-12-05 录用日期: 2020-02-05

作者简介: 王艳会(1995—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事农田生态水文研究。E-mail: 1659372590@qq.com

*通信作者: 王力 E-mail: wangli5208@nwfau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41830754)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(41830754)

在全球范围内,水资源短缺是作物生长和高产的主要限制因子,并可能导致许多地区作物产量的损失^[1-2]。关中平原是陕西省乃至西北的主要粮食种植区,其土地肥沃、灌溉条件完善、光温充足,小麦播种面积和总产量分别约占陕西省的80%和85%^[3],对我国粮食安全保障有重要意义。近50 a来关中平原年均降水量为574.1 mm,平均以每10 a减少1.2 mm的趋势变化,并且气温呈波动上升趋势,表现出气候暖干化倾向^[4]。同时,该区为气候敏感地区,年降水量差异较大,干旱胁迫通常发生在该地区的生长季节,严重制约着冬小麦的生长,导致产量降低^[5]。因此进行适量灌溉是提升冬小麦产量的关键措施。目前,该地区的小麦田灌溉存在灌水量大、灌溉方式粗放等问题,导致水分利用效率较低^[6],不仅造成有限水资源的严重浪费,而且制约了该区小麦产量的有效提升。因此,在水资源不足条件下,需进一步探索冬小麦在各生育期水分消耗方式的机制,并以此为依据将有限的灌溉水量投入到对作物产量贡献最大的生育阶段,使水资源发挥更大的作用,提高小麦水分利用效率,以期实现农业节水高效的可持续发展。

多年来我国农业水资源供需矛盾十分突出,尤其西北雨养农业区水资源短缺问题更为严重。因此,发展节水高效的农业用水方式是解决这一问题的关键措施。目前,我国在农艺节水、工程节水、生理节水和管理节水等方面已取得长足发展^[7],同时一些新颖的农业节水增效的途径也应运而生。活化水技术指利用物理技术将普通水进行处理,使水的理化性质(pH值、电导率、表面张力、黏滞系数、渗透性等)发生显著改变,从而提高水分子活性^[8]。这些变化有利于土壤理化性质改良和作物生长^[9],间接提高水、肥、土的有效利用率^[10]。近年来,磁化(水分子通过特定磁场)、去电子(水分子通过去电子器)等灌溉水活化技术因其具有简便、低耗能、低投入、无污染且高效的特点^[11],受到学者们的广泛关注。去电子水处理技术最早由美国提出,广泛用于工业水油分离处理,在农业生产过程中,主要利用其可以中和劣质灌溉水高盐度的特性,从而降低劣质水灌溉对作物的不利影响,以更好地促进作物植株生长^[8]。目前国内外对于去电子水理化特性的研究还相对较少,其在农业灌溉过程中的应用也是近年来才开始被关注^[12]。有学者认为利用去电子微咸水进行灌溉,不仅可以提高水分利用效率和作物产量,还可以改善土壤水盐运移特性,减轻土壤盐分胁迫^[12-13]。

水分作为冬小麦生产的主要限制因子,在农业生产过程中存在灌溉水生产效率低、水资源总量不足及分布不均、开发难度大等突出问题,影响了农业的高效可持续发展^[14-15]。针对这一问题,本研究以灌溉水活化技术为手段,选取位于关中平原典型灌区的曹新庄试验农场为研究区,在冬小麦关键生育期进行去电子水灌溉(普通水作对照),深入研究冬小麦生长与水分利用对去电子水灌溉的响应,并探讨去电子水灌溉的最佳模式,为冬小麦节水增产提供新视角,也为雨养农业区节水增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018年10月—2019年5月在陕西省杨陵区曹新庄试验农场(108°04′02″E, 34°17′38″N,海拔520 m)进行。该区属于黄土台塬地貌,坡地与塬地相间,年均降水量550~600 mm,年均气温12.9℃,属半湿润易旱区,其中冬小麦生育期总有效降水量为187.2 mm,且主要集中在4、5月份,分别占总降水量的35.2%与36.1%,生育期内最低气温为-5.4℃,最高气温为28.2℃(图1)。

供试土壤类型为土垫旱耕人为土(塬土),土质疏松,主要耕作方式为冬小麦与夏玉米轮作,播前0~20 cm耕层土壤容重 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,有机碳含量 $9.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,矿质氮含量 $14.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $6.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $124.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为小偃22号,播种时间为2018年10月15日,播种量为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,播种前施基肥,参照当地农作水平,施用 $242 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的氮肥和

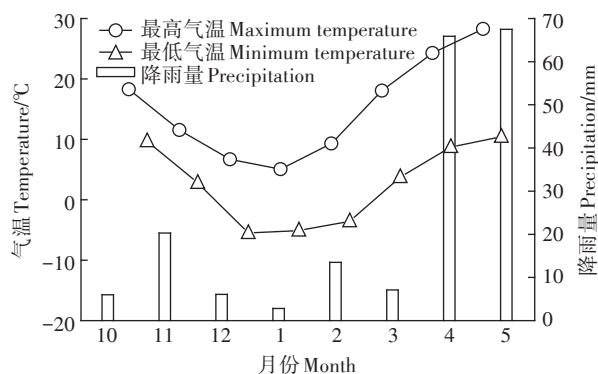


图1 冬小麦生育期内降水量与气温分布(2018—2019年)

Figure 1 Monthly precipitation and temperatures during growing period of winter wheat (2018—2019)

172 kg $P_2O_5 \cdot hm^{-2}$ 的磷肥,肥料分别为尿素和磷酸二铵,同时施农药辛硫磷 45 kg $\cdot hm^{-2}$ (防止地下蛀虫),并且对前茬玉米进行了秸秆还田,随后深翻 30 cm。

试验采用随机区组设计,涉及灌水量与灌水类型两个因素。在冬小麦越冬期(1月15日)、拔节期(4月12日)、灌浆期(5月24日)分别采用滴灌系统进行灌溉。灌水类型包括普通水和去电子水,其中去电子水灌溉设置灌溉量梯度,单次灌溉量为 20、40、60 mm 和 80 mm 4 个梯度;普通水单次灌溉量为 60 mm,并且试验设 0 mm 灌溉为空白对照,共计 6 个处理(见表 1),每个处理重复 3 次,共 18 个小区,小区面积 16 m² (4 m×4 m),小区间隔 0.6 m。

表 1 试验各处理不同灌水时期及灌水量(mm)

Table 1 The different irrigation periods and irrigation amount of each treatment (mm)

处理 Treatments	灌水类型 Irrigation type	次灌水量 Irrigation amount per time			总灌水量 Total irrigation amount
		越冬期 Wintering	拔节期 Jointing	灌浆期 Filling	
I0	无	0	0	0	0
I180	普通水	60	60	60	180
DI240	去电子水	80	80	80	240
DI180	去电子水	60	60	60	180
DI120	去电子水	40	40	40	120
DI60	去电子水	20	20	20	60

1.3 活化水制备

去电子水由去电子处理系统制成,该系统包括去电子处理器、导线、接地电极等。去电子处理器[韩国亚美华(北京)环境科技发展有限公司生产]型号为 W600DELFI,接地电极的电阻为 5 Ω ,与导线连接并将其插入地下。当水流经去电子处理器时,接地电极将水中的电子和负电荷导入地下,水体中的盐分物质只剩正离子和正电荷,从而制成去电子水^[12]。

灌溉系统由去电子处理系统、塑料水桶(800 L)、自吸喷射泵(中国台州汇精机电有限公司, JET-1100)、压力表、滴灌系统(包括主管道与滴灌带)等构成。水流经过去电子器后进入水桶中,进而由自吸泵导入滴灌系统中,滴灌带铺设在靠近冬小麦的部位,每小区铺设 20 条,滴头间距 30 cm,滴头流量 1.38 L $\cdot h^{-1}$,单次灌溉量为 20、40、60、80 mm 时,灌溉水量分别为 320、640、960、1280 L,并以此为依据制备去电子水。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 降水量

利用位于试验区附近(50 m)的自动气象站,对研

究期间的降水量(mm)进行连续监测。

1.4.2 冬小麦生长指标

生物量:分别于冬小麦拔节期(4月15日)与灌浆期(5月9日)测定一次植株鲜质量和干质量,每个小区随机采集具有代表性的植株 5 株(只取地上部分),带回实验室先测其鲜质量,然后放入烘箱,于 105 $^{\circ}C$ 杀青 0.5 h 后调至 70 $^{\circ}C$ 烘干,称质量。

株高:以上用于测定生物量的样品采回后,用卷尺测定冬小麦植株的高度,取平均值。

1.4.3 光合指标

采用美国 LI-COR 公司产 LI-6800 便携式光合测定仪,在冬小麦拔节期(4月19日)与灌浆期(5月13日)上午 09:30—11:30 分别测定一次旗叶净光合速率(A)、蒸腾速率(E),在人工光源的条件下,设定光强为 1000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,每重复取 3 片生长一致且受光方向相近的旗叶测定。

1.4.4 旗叶 SPAD 值(相对叶绿素含量)

采用日本柯尼卡美能达公司生产的手持式 SPAD-502 型叶绿素仪,分别在拔节期(最上部展开叶)和灌浆期测定冬小麦旗叶的 SPAD 值,每重复随机取 5 片生长一致的旗叶测定。

1.4.5 水分指标

土壤含水量:每个小区中心位置打 3 m 深的土钻,然后埋设 PVC 材质中子管,使用 CNC503B 型智能中子水分仪(北京核子仪器公司),从冬小麦返青后期到成熟期每隔 15 d(阴雨天适当延迟)测定一次,其中 0~100 cm 土层每 10 cm 测定一次,100~280 cm 土层每 20 cm 测定一次。中子仪进行标定后根据标定曲线计算 0~280 cm 各土层土壤体积含水量^[16]。

土壤储水量由公式(1)^[17-18]计算:

$$SWS = k \cdot \sum SWC_i \cdot H_i \quad (1)$$

式中: SWS 是土壤储水量,mm; SWC_i 是第 i 层的土壤含水量, $cm^3 \cdot cm^{-3}$; H_i 是第 i 层土壤的厚度,cm; k 是转换系数,10 mm $\cdot cm^{-1}$ 。

土壤储水量变化的计算公式^[18]为:

$$\Delta SWS_j = \sum_i SWS_{j,i} - \sum_i SWS_{j-1,i} \quad (2)$$

式中: ΔSWS_j 是第 j 个生育期的土壤储水量变化,mm; $SWS_{j,i}$ 是第 j 个生育期第 i 层土壤的储水量,mm; $SWS_{j-1,i}$ 是第 j 个生育期的前一个生育期第 i 层土壤的储水量,mm。

蒸散量根据农田水分平衡原理,按照公式(3)^[19]进行计算:

$$ET = P + I + \Delta SWS + CR - R - D \quad (3)$$

式中: P 为生育期内有效降水量, mm; I 代表生育期灌溉量, mm; ΔSWS 为土壤储水消耗量(播种期的土壤储水量与收获期的土壤储水量之差), mm; CR 为毛管上升到根区的水量, mm; R 为地表径流量, mm; D 为深层渗漏量, mm。试验区地下水深埋 10 m 以下, 故地下水通过土壤毛管孔隙补充土壤水量可不计, $CR=0$; 且该区地势平坦, 生育期内降雨与灌水无径流形成, $R=0$; 使用蒸渗仪长期测定表明没有渗漏, $D=0$, 式(3)简化为:

$$ET = P + I + \Delta SWS \quad (4)$$

不同耗水来源所占比例为各耗水来源与总耗水量的比值。

1.4.6 产量及产量构成指标

成熟期, 每个小区收获 1 m² 样方内冬小麦, 晒干后测定其穗数、穗粒数、千粒重与籽粒产量。

1.4.7 水分利用效率及灌溉水生产力

籽粒产量水分利用效率采用公式(5)^[20]计算:

$$WUE = Y/ET \quad (5)$$

灌溉水生产力采用公式(6)^[21]计算:

$$IWP = (Y - Y_0)/I \quad (6)$$

式中: WUE 为籽粒产量水分利用效率, kg·hm⁻²·mm⁻¹; Y 为籽粒产量, kg·hm⁻²; ET 为冬小麦生育期蒸散量, mm; IWP 为灌溉水生产力, kg·hm⁻²·mm⁻¹; Y_0 为零灌溉处理籽粒产量, kg·hm⁻²; I 为生育期灌溉量, mm。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 22 进行数据处理和分析。用单因素(One-way ANOVA)和 Duncan 新复极差法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$), 并用 Origin 9.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 去电子水灌溉下土壤水分垂直分布差异

2.1.1 土壤储水量变化

为了明确不同灌溉处理下冬小麦各生育期对不同土层的水分消耗, 计算了各生育期之间不同土层的土壤储水量变化量, 通过比较 0~100、100~200 cm 与 200~280 cm 土层土壤储水量的变化来确定各处理冬小麦生长的水分消耗深度(图 2), 变化量值越小, 说明该层次水分消耗越多。分析图 2 可知, 相较于其他处理, 10 处理从返青后期到成熟期土壤储水量变化量最大, 所有层次共减少 41.1 mm, 说明无灌溉水补给, 冬小麦主要利用土壤储水, 导致土壤储水量显著降

低。同一灌溉量(180 mm)水平下, 冬小麦返青期到拔节期, 1180 处理下土壤水分消耗深度为 0~100 cm, 而 D1180 处理为 100~200 cm; 从拔节期到灌浆期, 1180 与 D1180 处理均主要消耗 200~280 cm 土层水分; 灌浆期到成熟期, 该两种处理土壤水分消耗最多的深度均为 100~200 cm。整体看来, 冬小麦返青到成熟期, D1180 处理下 0~280 cm 土层储水量减少 30.9 mm, 普通水灌溉则增加 21.5 mm。说明同一灌溉量条件下, 去电子水灌溉比普通水灌溉的冬小麦水分消耗量更大。

不同深度土层的土壤储水量变化随着灌溉量的不同表现出一定差异。从返青后期到拔节期, 去电子水灌溉处理下, 总灌溉量为 240、180 mm 与 120 mm 时, 冬小麦主要消耗 100~200 cm 土层的水分; 对总灌溉量为 240 mm 而言, 尽管土壤储水量表现为在不同层次均有增加, 但 100~200 cm 土层增加最少, 显示冬小麦更多地消耗了该层次的水分; 当灌溉量为 60 mm 时则消耗 0~100 cm 土层水分较多。冬小麦拔节期到灌浆期, 去电子水灌溉处理土壤水分消耗深度都集中在 200~280 cm; 灌浆期到成熟期, 去电子水灌溉 60 mm 与 180 mm 分别消耗 0~100 cm 与 100~200 cm 土层水分较多, 其他处理都集中在 200~280 cm 土层。

2.1.2 冬小麦拔节期与灌浆期土壤含水量对不同灌溉的响应

不同灌溉处理下冬小麦拔节期与灌浆期 0~280 cm 土层土壤水分垂直变化状况如图 3 所示。普通水与去电子水均灌溉 180 mm 时, 在 0~25 cm 土层, 拔节期和灌浆期各处理土壤水分垂直变化趋势一致, 表现为增加趋势, 拔节期增加幅度小, 灌浆期土壤水分增加幅度大, 这是因为灌浆期降雨多(图 1)。在 25~75 cm 土层, 拔节期各处理土壤水分呈现先减少后增加的变化趋势, 这是由于拔节期需水量大, 但拔节前期补灌一次, 水分入渗补给土壤水; 灌浆期各处理土壤含水量波动递减, 说明灌浆期亦为冬小麦需水的关键期。75~280 cm 土层, 拔节期与灌浆期各灌溉处理下土壤水分垂直变化差异较大, 波动幅度亦比较大。

分析图 3c 可知, 拔节期去电子水灌溉的土壤含水量呈现为波动递增趋势, 并且总灌溉量为 240 mm 与 180 mm 时的 0~280 cm 土层土壤储水量(830.5 mm 与 709.4 mm)明显高于总灌溉量为 120 mm 与 60 mm 时的土壤储水量(693.1 mm 与 682.2 mm), 这是由于拔节期进行一次补灌, 灌溉量越多, 入渗补给也就越充分。从图 3d 可以看出, 灌浆期去电子水灌溉处理

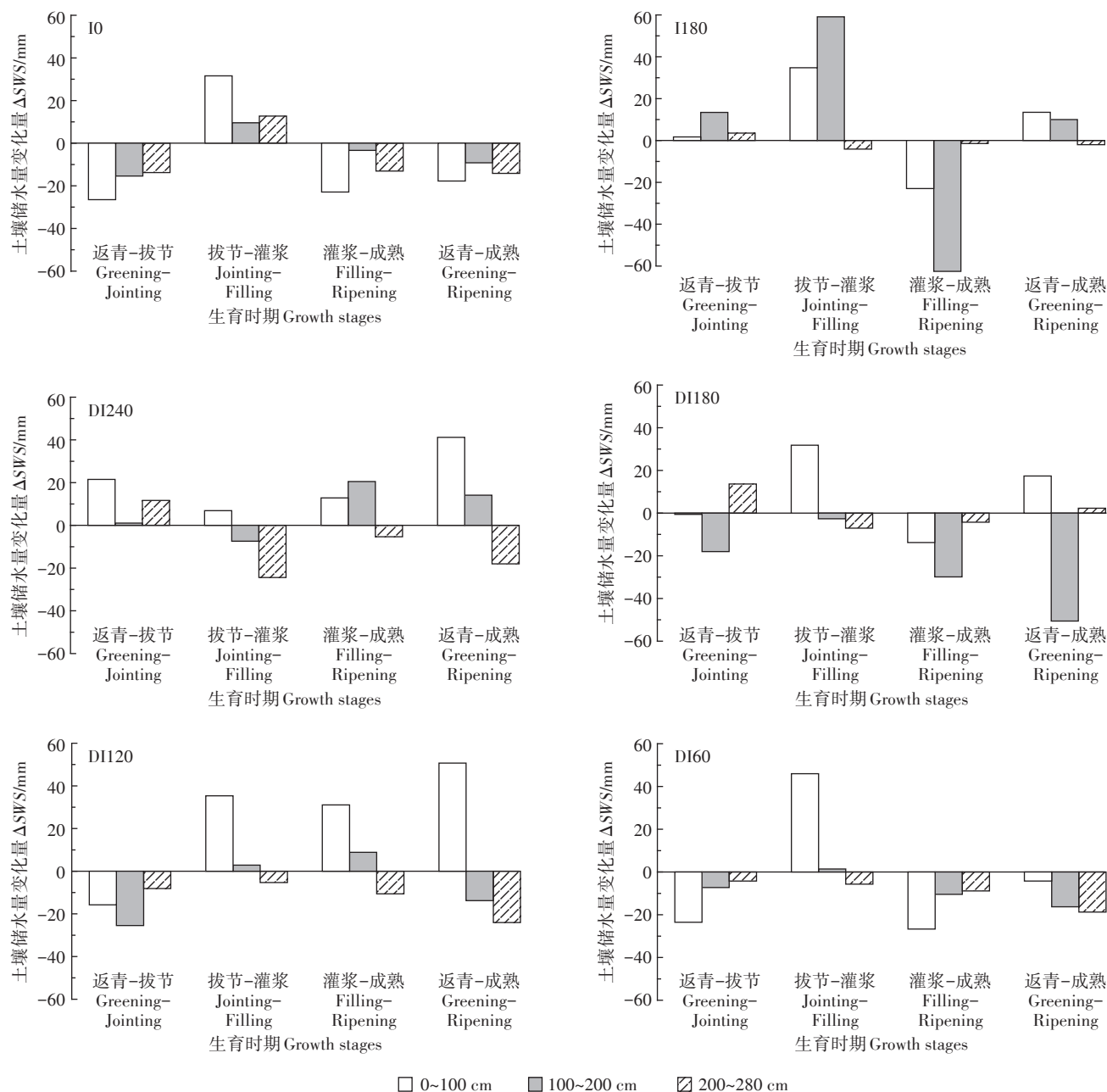


图2 不同灌溉处理各生育期不同深度土层土壤储水量变化量

Figure 2 The variations of soil water storage in different depths at different growth stages under different irrigation treatments

下土壤水分变化趋势在0~75 cm土层呈先增加后减少再增加的分布特点,且波动幅度较大。在75~280 cm土层,各处理土壤含水量垂直变化的波动幅度均较大,其中DI240与DI180处理0~280 cm平均土壤含水量(28.8%与26.3%)高于DI120与DI60处理(25.7%与26.0%)。总体看来,冬小麦拔节期与灌浆期,去电子水灌溉表现为灌溉量高的土壤深层含水量较大,灌溉量低的土壤深层含水量较小。这表明较低的灌溉量水分下渗较少,而较高灌溉(240 mm)虽使得土壤

水分得到有效补给,但不能完全被冬小麦吸收利用,不符合农业生产高效节水灌溉的理念,所以需要确定适宜的灌溉量,从而节约水资源。

2.2 去电子水灌溉对冬小麦耗水特性的影响

冬小麦生育期耗水主要来源于降水、灌溉水和土壤贮水。从表2可看出,冬小麦生育期总耗水量以I0处理最低,DI240处理最高。同一灌溉水平下,DI180处理的冬小麦全生育期总耗水量(439.2 mm)高于I180处理(429.2 mm),但两处理间冬小麦总耗水量及

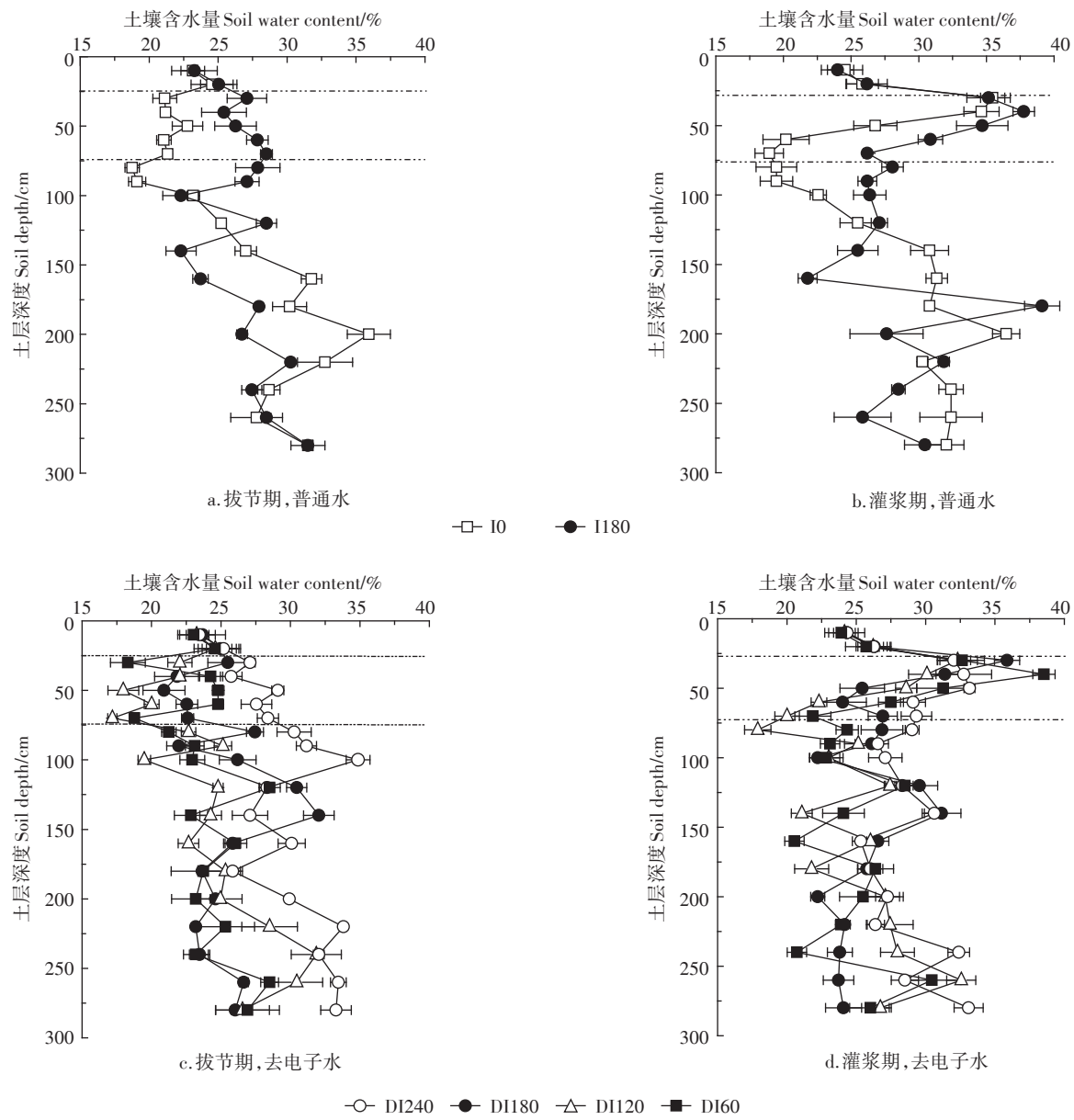


图3 不同灌溉处理下冬小麦拔节期与灌浆期0~280 cm土层土壤含水量

Figure 3 The soil water content of 0~280 cm soil layer at the jointing and filling stage of winter wheat under different irrigation treatments

表2 去电子水灌溉下冬小麦耗水量和不同耗水来源所占比例

Table 2 The water consumption of winter wheat and the proportion of different water consumption sources under de-electronic water irrigation

处理 Treatments	总耗水量 Total water consumption/mm	土壤水消耗量 Soil water consumption/		灌水量 Irrigation amount/		降水量 Precipitation amount/	
		mm	%	mm	%	mm	%
I0	405.7b	218.5a	53.9a	0	0.0	187.2	46.1a
I180	429.2ab	62.0d	14.4d	180	41.9b	187.2	43.6ab
DI240	441.2a	14.0e	3.2e	240	54.4a	187.2	42.4b
DI180	439.2a	72.0d	16.4d	180	41.0b	187.2	42.6b
DI120	427.9ab	120.7c	28.2c	120	28.0c	187.2	43.7ab
DI60	417.8ab	170.6b	40.8b	60	14.4d	187.2	44.8ab

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。
Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

土壤水、降水与灌水占总耗水量的比例均无显著差异($P>0.05$)。从去电子水灌溉量梯度的角度分析,冬小麦总耗水量均随着灌水量的增加而增加,但各处理间无显著差异;土壤水消耗量则表现为随着灌水量的增加而降低,且各处理均与其他处理差异显著($P<0.05$);降水量占总耗水量的比例亦随着灌水量的增加而降低,但各处理间差异不显著($P>0.05$)。由此可知,灌水增加了总耗水量而降低了土壤水与降水的消耗,随着灌水量的增加,土壤水和降水的消耗比例显著降低。

2.3 去电子水灌溉下冬小麦的株高与干物质质量变化

如表3所示,不同灌溉处理下,冬小麦拔节至灌浆期株高与干物质质量的变化表现出一定差异。同一灌溉量(180 mm)条件下,冬小麦拔节期与灌浆期,DI180与I180处理的株高差异不显著($P>0.05$);从拔节期到灌浆期,I180处理下株高增加了8.2 cm,DI180处理下则增加了13.3 cm,且二者存在显著差异($P<0.05$),说明与普通水相比,去电子水灌溉下冬小麦的增长速率更快。从灌溉梯度的角度分析,拔节期去电子水各灌溉处理下冬小麦的株高无显著差异($P>0.05$);到灌浆期DI240处理的株高(81.9 cm)最大,其次为DI180处理,二者之间差异显著,且均显著大于其他处理($P<0.05$);从拔节至灌浆期,株高的增幅随着灌溉量的增加而增加,DI240处理的增幅(20.6 cm)

显著高于其他处理($P<0.05$)。

冬小麦干物质质量方面,相同灌溉量水平(180 mm)下,拔节期与灌浆期的干物质质量均表现为DI180处理显著大于I180处理($P<0.05$),分别提高了11.3%与29.7%;且从拔节期到灌浆期,DI180处理的干物质质量增幅($1.0\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$)显著大于I180处理($0.4\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$) ($P<0.05$)。不同灌溉量梯度下,拔节期DI240与DI180处理的干物质质量显著大于其他处理($P<0.05$),二者之间差异不显著;到灌浆期,DI180处理的干物质质量($3.9\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$)显著最高,DI240处理次之;且从拔节期到灌浆期,DI180处理的干物质质量增幅亦显著大于其他处理($P<0.05$)。综上所述,去电子水灌溉对地上部干物质质量的累积效果优于普通水灌溉,其中去电子水灌溉180 mm时累积效果最好。

2.4 去电子水灌溉对冬小麦产量及产量构成的影响

不同灌溉处理对冬小麦产量及产量构成的影响不同(表4)。同一灌溉量水平(180 mm)下,DI180与I180处理的冬小麦穗数、穗粒数与千粒重的差异均未达到显著水平,但DI180处理的产量($9\ 354.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著大于I180处理($7\ 940.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) ($P<0.05$),提高了17.8%。去电子水不同灌溉梯度下,DI120处理的千粒重(46.6 g)显著大于DI60处理(44.5 g) ($P<0.05$),DI180处理的产量显著大于DI120与DI60处理

表3 冬小麦生育期各处理株高与干物质质量的变化

Table 3 The change of plant height and dry matter in each treatment during growth stages

处理 Treatments	拔节期(04-15)Jointing		灌浆期(05-09)Filling		增长量(Jointing-Filling)Growth	
	株高 Height/cm	干物质质量 Dry matter/g·株 ⁻¹	株高 Height/cm	干物质质量 Dry matter/g·株 ⁻¹	株高 Height/cm	干物质质量 Dry matter/g·株 ⁻¹
I0	56.45b	2.55b	59.6d	2.89d	3.15de	0.34b
I180	61.80a	2.65b	70.03b	3.03cd	8.23c	0.38b
DI240	61.36a	2.92a	81.93a	3.47b	20.57a	0.55b
DI180	59.13ab	2.95a	72.47b	3.93a	13.34b	0.98a
DI120	58.54ab	2.70b	66.17c	3.30bc	7.63cd	0.6b
DI60	60.66a	2.61b	63.30c	2.96d	2.64e	0.35b

表4 去电子水灌溉处理下冬小麦的产量及产量构成

Table 4 The yield and yield components of winter wheat under de-electronic water irrigation

处理 Treatments	穗数 Spike number/ $\times 10^2\cdot\text{m}^{-2}$	穗粒数 Spike grain number	千粒重 Thousand-grain weight/g	产量 Yield/kg·hm ⁻²
I0	4.77a	39.92b	43.73c	6 369.43c
I180	5.25a	46.28a	46.22ab	7 940.20b
DI240	5.35a	45.18ab	45.57abc	8 558.60ab
DI180	5.72a	44.93ab	45.54abc	9 354.10a
DI120	5.03a	48.32a	46.64a	8 215.97b
DI60	4.42a	47.60a	44.54bc	7 895.67b

($P<0.05$),其他各处理间冬小麦产量、产量构成差异不显著($P>0.05$)。总体看来,与I0处理相比,I180处理的冬小麦增产24.7%,而DI180处理则增产46.9%,说明同一灌溉量处理下,去电子水较普通水灌溉增产作用大;且去电子水不同灌溉量处理下,灌溉180 mm时获得最高的产量。

2.5 去电子水灌溉对冬小麦水分利用效率与灌溉水生产力的影响

不同灌水处理冬小麦的水分利用效率与灌溉水生产力有所差异(图4)。如图4所示,同一灌溉量(180 mm)水平下,DI180处理的WUE比I180处理提高了15.1%,且二者差异显著($P<0.05$);灌溉水生产力方面亦表现为DI180处理的IWP(16.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)显著大于I180处理(8.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)($P<0.05$)。去电子水不同灌溉梯度下,DI180处理的WUE最高,DI60处理最低,各处理间无显著差异;DI60处理的IWP(25.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)显著最高,DI120与DI180处理间的IWP(15.4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 与16.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)无显著差异,二者均显著高于DI240处理(9.1 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 去电子水灌溉对作物生长的影响

水是土壤和作物生物体重要的组成成分,作为土壤物质运移、养分输送与作物新陈代谢的载体,存在于植株生长的整个过程。活化水(磁化水、去电子水等)在一定程度上改变了水的理化特性,因此可能会对作物生长产生一定的影响^[22]。研究表明去电子微

咸水灌溉可以促进棉花植株生长发育,与未活化微咸水处理相比,棉花的株高、茎粗、叶面积指数及叶绿素含量均有不同程度的提高,并且使作物根系吸水能力增强,从而增加耗水量,进而增加作物产量^[13,23-24]。本研究结果也表明去电子水灌溉有利于冬小麦地上部生长,并提高冬小麦产量。具体表现为同一灌溉量水平(180 mm)下,从拔节期到灌浆期,去电子水灌溉的冬小麦株高的增长速率与干物质的累积量均显著高于普通水灌溉处理;且去电子水灌溉的籽粒产量显著大于普通水灌溉,提高了17.8%

作物的生长几乎都依赖于光合作用的产物,形成作物产量的有机物都直接或间接来自光合产物,光合作用是作物产量形成的基础^[25]。作物产量的多少及品质的好坏与作物叶片光合作用有关,一般来说光合速率越高,作物产量越高。因此去电子水灌溉对作物生长的影响需要从光合作用机制角度来进行分析。可能途径主要有以下几方面:(1)影响水分利用效率。水分是光合作用的原料,当细胞缺水时,气孔关闭,CO₂进入受阻,从而间接影响光合作用。本研究发现DI180处理的WUE比I180处理显著提高了15.1%,且DI180处理的IWP(16.6 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)显著大于I180处理(8.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)。(2)影响光合面积和光合参数,包括净光合速率、蒸腾速率等。如图5(a),本研究中DI180处理的拔节期与灌浆期冬小麦旗叶净光合速率、蒸腾速率较I180处理分别提高了13.7%与9.0%、38.0%与5.9%。(3)影响叶绿素含量,叶绿素是叶绿体中最为重要的色素,在光合作用过程中吸收和转化光能。如图5(b),本研究中DI180处理拔节期与灌浆期冬小麦旗叶SPAD值较I180处理分别提高了0.8%与4.0%,且与普通水灌溉相比,去电子水各灌溉处理都表现为灌浆期的叶片SPAD值不低于拔节期,可能是因为去电子水各灌溉量处理下灌浆后期冬小麦叶片仍保持绿色,可以推测去电子水灌溉可减慢生长后期叶片SPAD值的降低,延长冬小麦灌浆期,有利于光合产物的增加。(4)影响碳水化合物在作物主要器官内的相互转换过程,调控光合同化产物的合成、分配与消耗,进而决定作物产量的高低和品质的好坏,如通过影响反应过程中调控酶的活性来实现。这一原因还有待于进一步研究。

3.2 去电子水灌溉下耗水量、灌水量与产量、WUE的关系

研究表明,作物产量在一定范围内与灌溉水量呈正比例关系,但是当增加到一定灌溉量时,产量的增

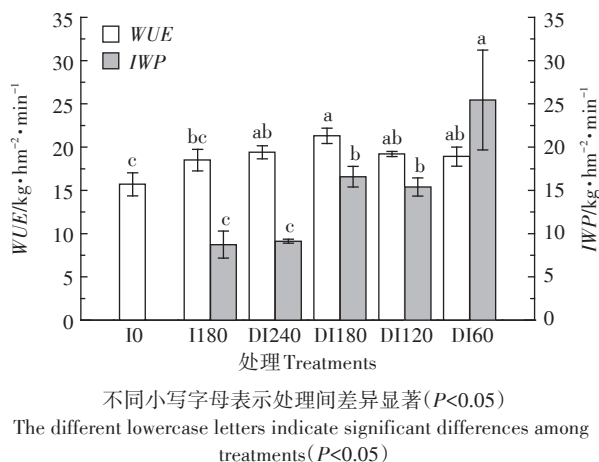


图4 去电子水灌溉处理下冬小麦的WUE与IWP

Figure 4 The WUE and IWP of winter wheat under de-electronic water irrigation

幅变小或者不增产,高灌水量不一定高产量,过多的灌水不仅会对冬小麦生长产生负面影响,更容易产生“奢侈蒸散”现象^[26-27]。本研究的试验结果与此结论相似,如图6(a)所示,去电子水灌溉量在60~180 mm范围内,产量与耗水量均随着灌溉量的增加而增加,当灌溉量大于180 mm时,产量降低,且耗水量的增加幅度变小。本研究发现,从拔节期到灌浆期,DI240处理的株高增幅(20.6 cm)显著大于其他处理,但其干物质累积量则低于DI180处理,最高产量亦是在灌溉180 mm处理下获得的。Qiu等^[28]的研究也表明,耗水强度会随着灌水量的增加而增大,但水分利用效率会随着灌水量的增加呈现先升高后降低的趋势。由图6(b)可看出,本研究中去电子灌溉处理与此结果

相似,DI180处理的冬小麦水分利用效率最高,DI240与DI120处理的WUE相近,DI60处理最低。因此在生产实践中,合理选择灌水定额对作物的生长、产量及水分利用效率至关重要。

4 结论

(1)同一灌溉量水平(180 mm)下,相较于普通水灌溉,去电子水灌溉处理加快冬小麦地上部的生长,产量、水分利用效率比普通水灌溉显著提高了17.8%与15.1%,且增产效果显著,与I0处理相比,普通水灌溉的冬小麦增产24.7%,去电子水灌溉则增产46.9%。原因可能在于去电子水灌溉可增强冬小麦光合作用,进而影响产量与品质。

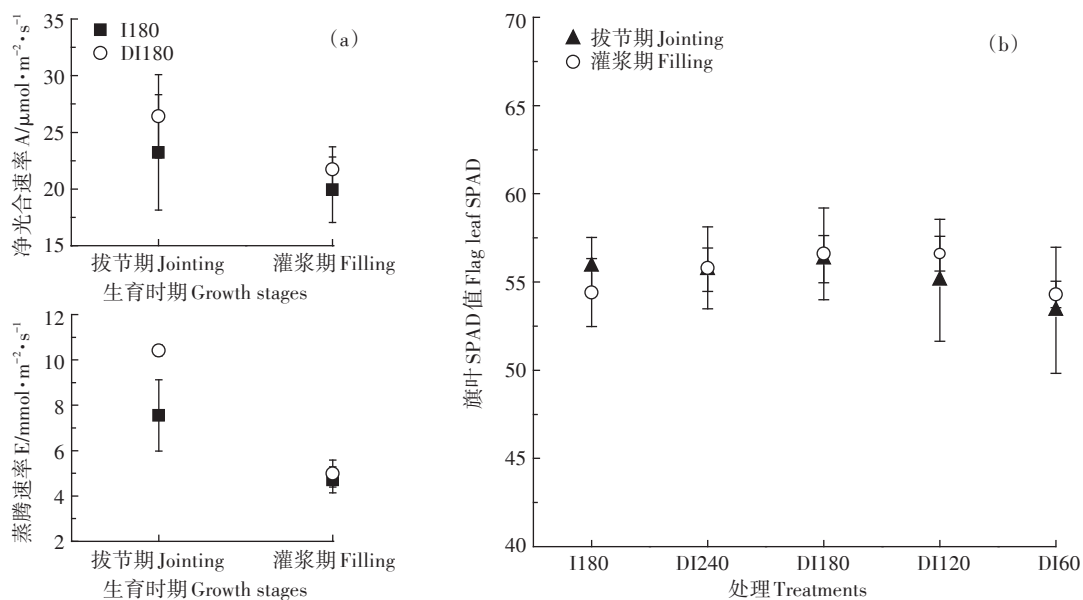


图5 冬小麦拔节期与灌浆期各处理旗叶净光合速率、蒸腾速率与SPAD值

Figure 5 Net photosynthetic rate, transpiration rate and SPAD values of flag leaves in each treatment at the jointing and filling stages of winter wheat

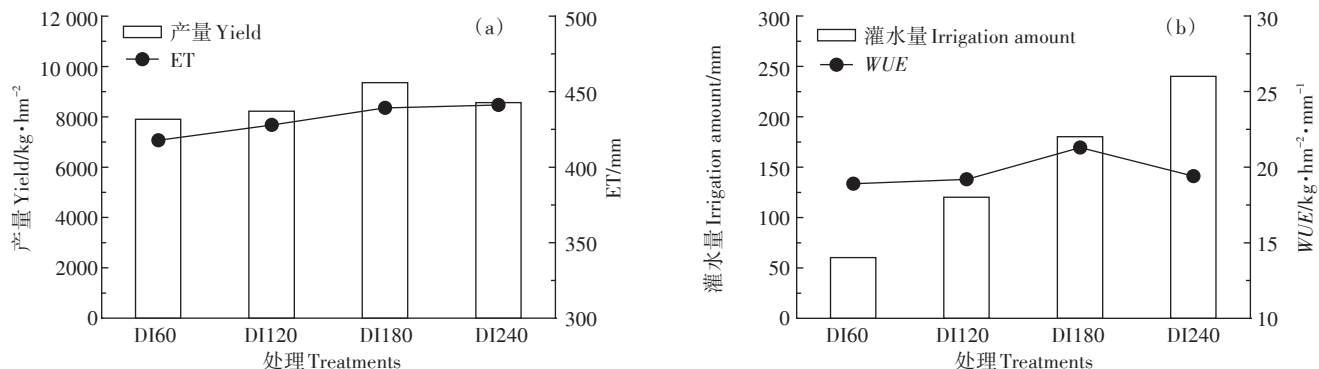


图6 去电子水灌溉下耗水量、灌水量与冬小麦产量、WUE的关系

Figure 6 The relationship between water consumption, irrigation amount and winter wheat yield, WUE under de-electronic water irrigation

(2)从不同灌溉量角度看,相较于其他灌溉量处理,DI180处理的 $WUE(21.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1})$ 最高,同时获得最高的籽粒产量。因此,可以将DI180处理作为关中平原冬小麦高效用水和高产的较优灌溉方案。

参考文献:

- [1] Eck H V. Effects of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn[J]. *Agronomy Journal*, 1986, 78(6): 1035–1040.
- [2] Ehdaie B. Variation in water-use efficiency and its components in wheat: II. Plot and field experiments[J]. *Crop Science*, 1995, 35(6): 1617–1626.
- [3] 张桂英, 张国权, 罗勤贵, 等. 陕西关中小麦品质性状的因子及聚类分析[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(3): 548–554.
ZHANG Gui-ying, ZHANG Guo-quan, LUO Qin-gui, et al. Factors and cluster analysis of wheat quality traits in Guanzhong, Shaanxi Province[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(3): 548–554.
- [4] 陈太根, 董 婕. 关中平原近49年来气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 76–81.
CHEN Tai-gen, DONG Jie. Analysis on climate change characteristics of the Guanzhong Plain in recent 49 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(12): 76–81.
- [5] Huang S Z, Hou B B, Chang J X, et al. Copulas-based probabilistic characterization of the combination of dry and wet conditions in the Guanzhong Plain, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3204–3213.
- [6] 吴普特, 冯 浩, 牛文全, 等. 中国节水农业战略思考与研发重点[J]. 科技导报, 2006(5): 86–88.
WU Pu-te, FENG Hao, NIU Wen-quan, et al. Strategic thinking and research and development focus of water-saving agriculture in China[J]. *Science & Technology Review*, 2006(5): 86–88.
- [7] 张 强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196–213.
ZHANG Qiang, YAO Yu-bi, LI Yao-hui, et al. Research progress and prospect of drought meteorological disaster monitoring and early warning and disaster mitigation technology in northwest China[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 196–213.
- [8] 穆 艳, 赵国庆, 赵巧巧, 等. 活化水灌溉在农业生产中的应用研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 403–411.
MU Yan, ZHAO Guo-qing, ZHAO Qiao-qiao, et al. Research progress on the application of activated water irrigation in agricultural production[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 403–411.
- [9] 卜东升, 奉文贵, 蔡利华, 等. 磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 163–166.
BU Dong-sheng, FENG Wen-gui, CAI Li-hua, et al. Effects of magnetization water on desalinization in cotton farmland of under-film drip-irrigation in Xinjiang Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S2): 163–166.
- [10] 李 铮. 不同水处理对番茄幼苗生长及其质量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016: 32–34.
LI Zheng. Effects of the different water treatment on tomato seedling growth and quality[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016: 32–34.
- [11] Maheshwari B L, Grewal H S. Magnetic treatment of irrigation water: Its effects on vegetable crop yield and water productivity[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(8): 1230–1236.
- [12] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 去电子处理微咸水矿化度对土壤盐盐运移特征的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 125–132.
WANG Quan-jiu, XU Zi-yue, SHAN Yu-yang, et al. Effect of salinity of de-electronic brackish water on characteristics of water and salt movement in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(4): 125–132.
- [13] 韦 开. 去电子微咸水膜下滴灌盐运移及棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018: 49–51.
WEI Kai. Research on soil water-salt distribution and cotton growth characteristics using de-electronic brackish water drip irrigation with plastic mulch[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 49–51.
- [14] Zhen Z, Cai H J, Yu L Y, et al. Application of the CSM-CERES-Wheat model for yield prediction and planting date evaluation at Guanzhong Plain in northwest China[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(1): 204–217.
- [15] 吴 昊. 关中平原水资源变化特征与干旱脆弱性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018: 3.
WU Hao. Study on the characteristics of water resources change and drought vulnerability in Guanzhong Plain[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018: 3.
- [16] 刘丙霞. 黄土区典型灌草植被土壤水分时空分布及其植被承载力研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015: 27–28.
LIU Bing-xia. Research on spatial and temporal distribution of soil water and vegetation carrying capacity of typical shrub vegetation in Loess area[D]. Yangling: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Soil and Water Conservation and Ecological Environment Research Center, Ministry of Education), 2015: 27–28.
- [17] Wei T, Dong Z, Zhang C, et al. Effects of rainwater harvesting planting combined with deficiency irrigation on soil water use efficiency and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in a semiarid area[J]. *Field Crops Research*, 2018, 218: 231–242.
- [18] 倪盼盼, 朱元骏, 巩铁雄. 黄土塬区降水变化对冬小麦土壤耗水特性及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 80–87.
NI Pan-pan, ZHU Yuan-jun, GONG Tie-xiong. Effects of rainfall fluctuation on soil water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat in the Loess Table Land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 80–87.
- [19] Li J P, Zhang Z, Yang L, et al. Effects of micro-sprinkling with different irrigation amount on grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 224.

- [20] Wang J, Liu W Z, Dang T H. Responses of soil water balance and precipitation storage efficiency to increased fertilizer application in winter wheat[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2):41-51.
- [21] Kale S, Sonmez B, Madenoglu S, et al. Effect of irrigation regimes on carbon isotope discrimination, yield and irrigation water productivity of wheat[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2017, 41(1):50-58.
- [22] 王全九, 孙 燕, 宁松瑞, 等. 活化灌溉水对土壤理化性质和作物生长影响途径剖析[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(6):660-670.
WANG Quan-jiu, SUN Yan, NING Song-rui, et al. Analyze the effects of activated irrigation water on soil physicochemical properties and crop growth[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(6):660-670.
- [23] 陈 勇. 活化微咸水膜下滴灌下施氮量对棉花生长影响的试验研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018:39-55.
CHEN Yong. Experimental study on effects of nitrogen fertilizer rate on cotton growth under drip irrigation under activated brackish water film[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2018:39-55.
- [24] 唐湘伟. 去电子微咸水膜下滴灌土壤水氮对棉花生长耦合作用研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019:52-55.
TANG Xiang-wei. Study on coupling effects of soil water and nitrogen on cotton growth under drip irrigation under de-electronic brackish water film[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2019:52-55.
- [25] 姚桃峰, 王润元, 王鹤龄, 等. 半干旱雨养农业区灌浆期模拟酸雨对春小麦叶片光合特性及产量的影响[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(6):638-646.
YAO Tao-feng, WANG Run-yuan, WANG He-ling, et al. Stress effects of simulated acid rain on photosynthetic characteristics and yield of field-grown spring wheat at the filling stage in semi-arid rain feed region[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(6):638-646.
- [26] 彭世彰, 朱成立. 节水灌溉的作物需水量试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003(2):21-25.
PENG Shi-zhang, ZHU Cheng-li. Experimental study on water demand of crops under water saving irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003(2):21-25.
- [27] 霍治国, 李世奎, 白月明, 等. 冬小麦中轻度水分胁迫的增产节水效应研究[J]. *自然资源学报*, 2003(1):58-66.
HUO Zhi-guo, LI Shi-kui, BAI Yue-ming, et al. The experimental research on slight and moderate water stress effects on increasing yield and saving water mechanism of winter wheat[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003(1):58-66.
- [28] Qiu G Y, Wang L, He X, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11):1848-1859.