

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23118

灌溉与有机肥处理对冬小麦水分利用效率的影响

李 斌¹, 宿顺顺², 冯 浩¹, 吴淑芳^{1*}, 胡亚瑾¹, 王建平³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 北京良乡蓝鑫水利工程
设计有限公司, 北京 102488; 3. 延安市宝塔区果业局, 陕西 延安 716000)

摘 要: 探究不同灌溉量和有机无机肥配施的组合处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响, 为冬小麦的科学施肥管理提供参考。以关中地区冬小麦‘小偃 22’为研究对象, 通过田间试验, 采用等氮原则对有机肥与无机肥进行不同比例配施 (F1, 100% 无机肥; F2, 24% 有机肥 +76% 无机肥; F3, 48% 有机肥 +52% 无机肥), 结合 2 个水平的灌溉 (充分灌溉 W1 和亏缺灌溉 W2), 共设计 6 个灌溉施肥组合处理 (W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2 和 W2F3)。通过测定冬小麦的生长指标 (植株株高和叶面积指数)、0 ~ 200 cm 土层土壤体积含水率 (以 20 cm 为深度间隔) 和小麦的产量及构成要素 (干物质质量、穗长、有效穗数、千粒质量和籽粒产量), 分析灌水量与有机无机肥配施对冬小麦生长及水分利用效率 (WUE) 的影响。结果表明: (1) 充分灌溉 (W1) 条件下, F2、F3 处理株高较 F1 处理分别提高 3.4% ~ 21.2% 和 0.8% ~ 15.9%, 叶面积指数提高 5.7% ~ 18.5% 和 16.8% ~ 47.4%, 干物质质量提高 12.1% ~ 26.1% 和 21.1% ~ 36.0%, 穗长提高 12.5% 和 14.5%, 有效穗数提高 6.6% 和 9.3%, 千粒质量提高 18.3% 和 24.4%, 籽粒产量提高 14.8% 和 28.6%, WUE 提高 14.6% 和 27.5%; 亏缺灌溉 (W2) 条件下, 与 F1 处理相比, F2、F3 处理株高分别提高 8.5% ~ 16.2% 和 0.5% ~ 10.6%, 叶面积指数提高 4.9% ~ 20.7% 和 17.0% ~ 50.0%, 干物质质量提高 7.7% ~ 25.7% 和 15.0% ~ 34.6%, 穗长提高 12.3% 和 18.5%, 有效穗数提高 7.4% 和 18.0%, 千粒质量提高 15.3% 和 25.1%, 籽粒产量提高 13.1% 和 31.8%, WUE 提高 21.4% 和 35.2%。在相同灌溉水平下, 有机无机肥配施处理可以提高土壤体积含水率。(2) W2F2 处理对冬小麦株高增长最有效, 灌浆期达最大值, 较 W1F1 处理增长 10.4%; W2F3 处理对冬小麦叶面积指数、干物质质量、穗长、有效穗数、千粒质量影响最大, 成熟期较 W1F1 处理分别提高 23.6%、39.0%、20.3%、18.4% 和 33.1%。(3) W2F3 处理对冬小麦籽粒产量和 WUE 的影响最为显著, W1F1、W1F2、W1F3、W2F1 和 W2F2 处理籽粒产量分别提高了 35.5%、18.0%、5.3%、31.8% 和 16.6%; W1F1、W1F2、W1F3、W2F1 和 W2F2 处理 WUE 分别提高了 52.6%、33.2%、19.7%、35.2% 和 21.4%。亏缺灌溉与 48% 有机肥 +52% 无机肥组合处理的冬小麦籽粒产量和 WUE 最高, 该灌溉施肥管理方案为关中平原及环境相似地区冬小麦的科学施肥管理提供了科学依据。

关键词: 亏缺灌溉; 有机无机肥配施; 冬小麦; 产量; 水分利用效率

小麦是我国主要的粮食作物之一, 也是陕西省关中地区最主要的种植作物, 对当地的粮食安全和经济发展发挥着重大作用。关中地区降水分布不均且季节性干旱频发, 冬小麦生产中仍存在水肥管理不合理、产量及水肥利用效率较低等问题。时至冬小麦种植时期, 其降雨资源充沛, 在冬小麦需水期采用充分灌溉严重浪费水资源。同时, 为获高产当地长期大量投入化肥, 导致土壤有机质低下, 土壤板结严重^[1], 不断增加的化肥施用量

和过高的施用强度不仅浪费了资源, 也严重破坏了生态环境, 并加重了农业面源污染^[2-3]。科学施肥和灌溉不仅可以提高农田的生产力, 保持和改善土壤的生物学特性, 提高土壤肥力, 同时也可以促进冬小麦生长, 提高冬小麦产量和水分利用效率^[4-5]。有机无机肥配施和科学水肥管理, 对当地农田长期的可持续利用和土壤肥力改善具有重要的意义。

相关研究表明, 有机肥和无机肥配施可以提高土壤保水保肥能力, 改善土壤的物理结构, 提高肥料的利用效率, 从而促进产量的增加^[6-7]。孟爱红等^[8]研究了有机肥不同比例替代无机肥对大棚莴苣生长的影响, 结果表明, 有机肥替代 20% 化肥的莴苣产量表现最优, 较单施无机肥处理增

收稿日期: 2023-02-25; 录用日期: 2023-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1900300)。

作者简介: 李斌 (1997-), 硕士研究生, 主要从事农田水肥高效利用研究。E-mail: libinwgh@nwafu.edu.cn。

通讯作者: 吴淑芳, E-mail: wsfsj@163.com。

产 12.7%。Wei 等^[9]研究表明,长期有机无机肥配施可以显著提高小麦的产量,与单施有机肥及单施无机肥相比产量平均分别提高了 29% 和 8%。另外,适当的水分亏缺可以提高作物的水分利用效率(WUE),避免水分的过度消耗,而节约了灌溉水源。有研究表明,在冬小麦^[10]和棉花^[11]生育期设置一定程度的水分亏缺,可以抑制营养生长而促进生殖生长。蔡焕杰等^[12]研究表明,在作物早期阶段土壤含水率控制在田间持水量的 45% ~ 50%,并不会造成作物产量降低,且可明显提高作物水分利用效率。也有学者认为,在冬小麦抽穗期给予一定程度的水分亏缺,可以优化营养分配格局,提高籽粒产量^[13]。水分和养分对作物的作用不是孤立的,而是相互作用、相互制约的。在生产实践中,合理的水分调亏与施肥策略相结合,将更好地有助于作物产量的提高。

虽然目前关于施肥或灌溉对冬小麦生长发育和水分利用效率的研究较多,但是针对关中地区结合有机无机肥配施与亏缺灌溉组合处理的研究较少。为此,针对陕西关中地区农田水肥管理中普遍存在的大水多肥问题,本研究选取 3 种有机无机肥配施水平和 2 个灌溉水平开展 2 因素裂区试验,分析其对冬小麦各个生育期植株生长发育、籽粒产量、土壤体积含水率、土壤贮水量及作物水分利用效率等的影响,旨在建立科学的农田水肥管理措施,为提高关中区水肥利用效率并指导农业生产实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省关中地区杨凌高新农业产业示范区西北农林科技大学旱区节水农业研究院田间试验区(34° 16' 56" N, 108° 4' 30" E),当地海拔 521 m,多年平均降水量 617.8 mm,降水量季节分配不均,主要集中在夏季(7—9月);多年平均蒸发量为 1440 mm,属大陆性暖温带季风型半湿润气候;年平均温度为 13.0℃,年日照时数 2196 h,无霜期为 169 ~ 200。0 ~ 20 cm 土层土壤体积质量为 1.40 g/cm³,有机质含量为 13.1 g/kg,全氮为 0.97 g/kg,有效磷为 19.97 mg/kg,速效钾为 173.35 mg/kg, pH 为 8.17。试验时间为 2019 年 10 月 1 日至 2020 年 6 月 10 日。试验期间的降水量及日平均气温见图 1。

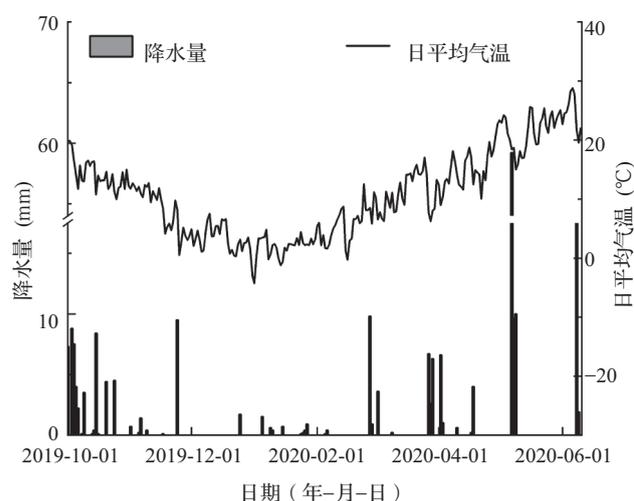


图 1 试验时间内研究区降水量及日平均气温

1.2 试验设计

研究选用的有机肥由杨凌霖科生态环境有限公司与中科院水土保持研究所共同研制,其组成(质量分数):油渣 45%,作物秸秆 25%,食用菌菌渣 8%,钙镁磷肥或磷矿粉 4%,中药渣 5%,石灰或草木灰 3%,解淀粉芽孢杆菌 1%,活性炭或胶原蛋白 4%,聚丙烯酰胺 5%。上述原料经过粉碎、制堆、熟化、发酵等一系列工艺合成,有机肥中有机质、N、P₂O₅、K₂O 的质量分数分别为 79.2%、6.7%、2.3% 和 0.3%。

供试冬小麦品种为小偃 22,是当地推广种植品种。试验设施肥和灌溉 2 个因素,采用 2 因素裂区试验设计,随机区组排列。其中施肥设 3 个水平:100% 无机肥(F1)、24% 有机肥+76% 无机肥(F2)和 48% 有机肥+52% 无机肥(F3);灌溉设充分灌溉(W1)和亏缺灌溉(W2) 2 个水平,试验有 W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2 和 W2F3 共 6 个处理,每个处理 3 次重复,各处理的施肥量和灌水情况见表 1。灌水采用喷灌方式,分别在冬小麦拔节期和灌浆期按灌水定额各灌溉一次。试验共设 18 个小区,每个小区面积为 18 m² (4.0 m × 4.5 m)。无机肥料选用尿素(N 46.4%)、磷酸二铵(N 12%, P₂O₅ 61%)。试供土壤为中壤土,当地冬小麦的传统施肥量:氮肥(N) 150.0 kg/hm²、磷肥(P₂O₅) 120.0 kg/hm²。所有肥料均作为基肥施用,在作物生育后期不再追肥。各小区均种植冬小麦 16 行,行距 25 cm,播种量为 187.5 kg/hm²。

表1 冬小麦有机无机肥配施与灌溉组合处理的施肥量和灌水量

处理	有机肥用量 (t/hm ²)	有机肥N量 (kg/hm ²)	灌水定额 (mm)	化肥N量 (kg/hm ²)	化肥N减少比例 (%)
W1F1	0	0	60	225	0
W1F2	4	53.44	60	171.56	24
W1F3	8	106.88	60	118.12	48
W2F1	0	0	30	225	0
W2F2	4	53.44	30	171.56	24
W2F3	8	106.88	30	118.12	48

注: 有机肥施用量分别按照4和8 t/hm²计算, 然后按照6.68%计算含氮量, 再按当季矿化率20%计算纯氮量, 最后用尿素将N补齐到225 kg/hm²。灌水定额表示在拔节期和灌浆期分别灌水60和30 mm。

1.3 测定指标及其测定方法

1.3.1 植株生长指标

在冬小麦越冬期(播后72 d)、返青期(播后131 d)、拔节期(播后162 d)、抽穗期(播后190 d)、灌浆期(播后207 d)、成熟期(播后231 d)进行取样, 每个处理均重复测定3次。每个小区选取10棵长势均匀的植株, 从其茎基部与地上部分分开后用卷尺测量茎基部至穗顶端(不包括芒)的距离(拔节前测定茎基部至最长叶片拉直间的长度), 即为株高。每个试验小区随机选取3行长势均匀的植株, 使用冠层分析仪 Suncan (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK) 测定叶面积指数, 以每个小区测定的平均值作为叶面积指数的测定值。植株的干物质量采用电子天平称量。抽穗之前分为叶和茎, 抽穗后分为叶、茎、穗轴+颖壳和籽粒4部分。把植株样品装袋放入烘箱于105℃杀青0.5 h, 75℃下烘干至恒质量, 分别测定冬小麦各组织的生物量, 最后计算整株的干物质量。

1.3.2 土壤体积含水率

土壤体积含水率使用时域反射仪 TDR (TRIME-IPH, IMKO, 德国) 测定。在每个小区中心位置安装 TRIME 管, 以20 cm为深度间隔, 在冬小麦的越冬期、拔节期、灌浆期和成熟期4个生育期内测定0~200 cm土层深度的土壤体积含水率。然后计算各土层土壤贮水量, 其计算公式:

$$H = \sum_{i=1}^n 10\theta_i h_i \quad (1)$$

式中: H 为各土层土壤贮水量 (mm); θ_i 为第 i 层土壤体积含水率 (%); h_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); n 为所测土壤体积含水率时的层数。

1.3.3 籽粒产量与水分利用效率

在冬小麦成熟期测定籽粒产量及其构成要素。每个小区随机选取1 m²剪取麦穗, 重复3次, 以其平均值为该小区的有效穗数(籽粒数大于5粒的穗数)。将取下的麦穗放在网兜中自然风干后测定穗长。之后再将所取麦穗脱粒后测定千粒质量和籽粒产量。根据籽粒产量和农田水分蒸散量(ET)计算作物水分利用效率(WUE), 其计算公式:

$$ET = H_1 - H_2 + P + I + K \quad (2)$$

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中: ET 为农田水分蒸散量 (mm); H_1 、 H_2 为初期与末期取样测得的0~200 cm土层贮水量 (mm); P 为作物生育期降水量 (mm); I 为灌溉水量 (mm); K 为时段内地下水补给量 (mm), 由于该试验田地下水埋深5 m以下, 可视地下水补给量为0; 本试验中不考虑地下深层渗漏和地表径流损失。 WUE 为水分利用效率 [kg/(hm²·mm)]; Y 为籽粒产量 (kg/hm²)。

1.4 统计分析

用 Excel 2021 对试验数据进行处理; 用 SPSS 20.0 对试验数据进行方差分析; 用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 有机无机肥配施与灌溉组合处理对冬小麦生长指标的影响

2.1.1 株高

由图2可见, 越冬期各处理的株高并无明显变化。返青期至灌浆期株高快速增长且各处理出现显著差异, 其中返青期至抽穗期植株增长速率最快, 至灌浆期株高达到最大, 进入成熟期后株高略有下降, 这是因为蒸散发强烈, 植株失水萎蔫所致。在同一灌溉条件下, 生育期各处理株高均表现为 F2>F3>F1, 说明在本试验条件下, 24% 有机肥和 76% 无机肥配施时冬小麦株高增长最优。此外, W2F2 处理较 W1F2 处理株高增长了 0.9%~6.1%, 说明亏缺灌溉比充分灌溉对冬小麦的株高增长更为有效。在所有处理中, W2F2 处理株高达到最大值, 为 70.72 cm, 较 W1F1 处理最大值增加了 10.4%。

2.1.2 叶面积指数

图3为有机无机肥配施与灌溉组合处理下冬小麦各生长发育期叶面积指数(LAI)的变化规律。从图3可知, 各处理叶面积指数随生育期均呈现先

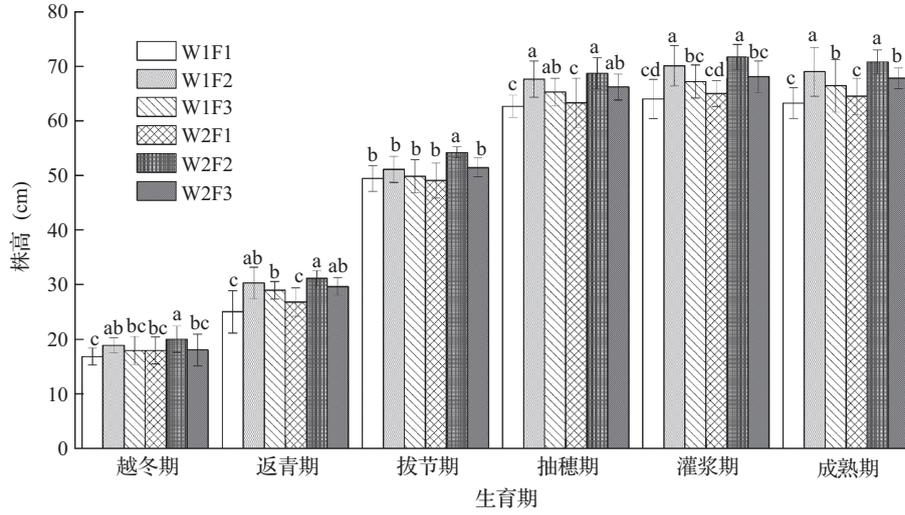


图2 有机无机肥配施与灌溉组合处理对冬小麦株高的影响

注：小写字母不同表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

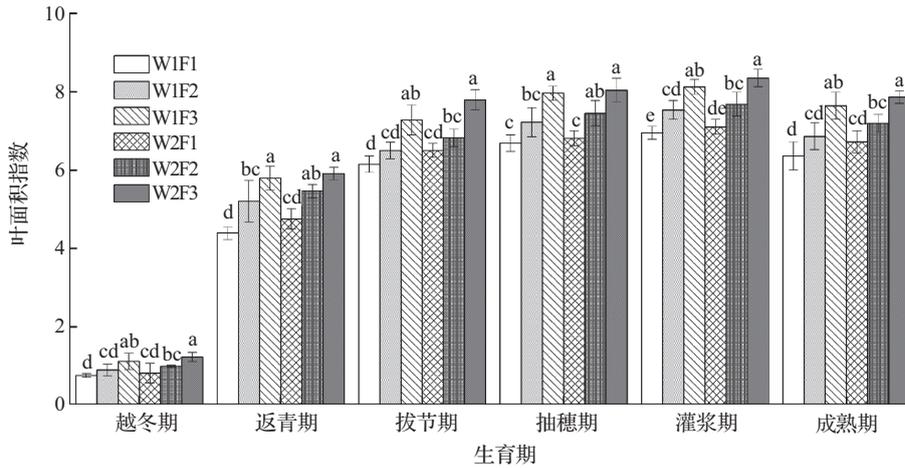


图3 有机无机肥配施与灌溉组合处理对冬小麦叶面积指数的影响

增大后减小的趋势，且在灌浆期达到最大值。灌浆期至成熟期，LAI有所减小是因为后期叶片衰老变黄。在相同灌水条件下，有机无机肥配施有利于增大冬小麦的叶面积指数。各生育期冬小麦叶面积指数均表现为 $F3 > F2 > F1$ ，说明有机肥可释放出更多养分供冬小麦生长。在同一施肥条件下，各生育期冬小麦叶面积指数均表现为 $W2 > W1$ ，说明亏缺灌溉较充分灌溉更有利于叶面积指数的增大。在施肥和灌溉的组合处理下，各生育期冬小麦 LAI 均表现为 $W2F3 > W1F3 > W2F2 > W1F2 > W2F1 > W1F1$ 。这说明亏缺灌溉与 48% 有机肥和 52% 无机肥组合处理对冬小麦叶面积指数的影响最大，其中，与 W1F1 处理相比，W2F3 处理冬小麦 LAI 增加了 20.1% ~ 34.1%。

2.1.3 干物质质量

由图 4 可见，冬小麦越冬期至抽穗期的干物

质量增长速率大于灌浆期至成熟期。在同一灌溉条件下，有机肥配施比例越大，冬小麦干物质质量越大，表现为 $F3 > F2 > F1$ 。有机无机肥配施处理下的干物质质量增长速率在各生长阶段略高于单施无机肥处理，尤其在灌浆期和成熟期表现最明显。这表明有机无机肥配施能够增加冬小麦干物质质量，进而促进冬小麦的生长发育。在同一施肥条件下，越冬期至返青期 W1 处理和 W2 处理干物质质量差异较小。在后 4 个生育期内，相同施肥条件下 W2 处理的干物质质量高于 W1 处理，其中 W2F3 处理的干物质质量比 W1F3 处理增加了 2.8% ~ 14.6%，这表明在同等施肥处理下，适当减少灌溉有利于冬小麦干物质积累。在两因素的组合处理下，冬小麦 6 个生育期内 W2F3 处理干物质质量积累最大，较 W1F1 处理增加了 30.1% ~ 39.8%。

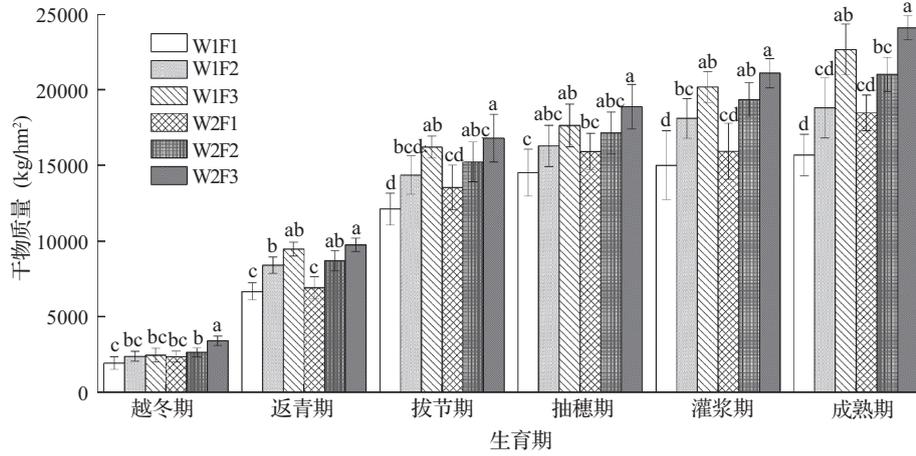


图4 有机无机肥配施与灌溉组合处理对冬小麦干物质量的影响

2.2 有机无机肥配施与灌溉组合处理对土壤体积含水率的影响

图5为有机无机肥配施与灌溉组合处理下冬小麦生育期土壤体积含水率的变化情况。从图5可以看出,冬小麦越冬、拔节、灌浆和成熟4个生育期内,越冬期和拔节期各处理土壤体积含水率随土层深度的增加增大后基本保持不变。越冬期W1F3处理土壤体积含水率最大(图5a)。与越冬期相比,拔节期各处理0~200cm土层平均土壤体积含水率降低了1.4%~5.1%,说明该生育期植株需水敏感,生长消耗了一部分土壤体积含水率(图5b)。

灌浆期土壤体积含水率先减小后增大,表层土壤体积含水率比拔节期大,表现出较高值是因为较大强度的降水补充了表层的土壤体积含水率。0~40cm土壤体积含水率减少是因为该层为主要耕作层,小麦根系也主要集中在该土层内,受冬小麦生长耗水和蒸散发的影响,各处理土壤体积含水率整体下降,对其余土层的土壤体积含水率影响较小(图5c)。成熟期各处理20~40cm土层土壤体积含水率与灌浆期相比均有不同程度回升,W1F3处理土壤体积含水率最大(图5d)。冬小麦全生育期内W1F1、W1F2、W1F3、W2F1、W2F2和W2F3

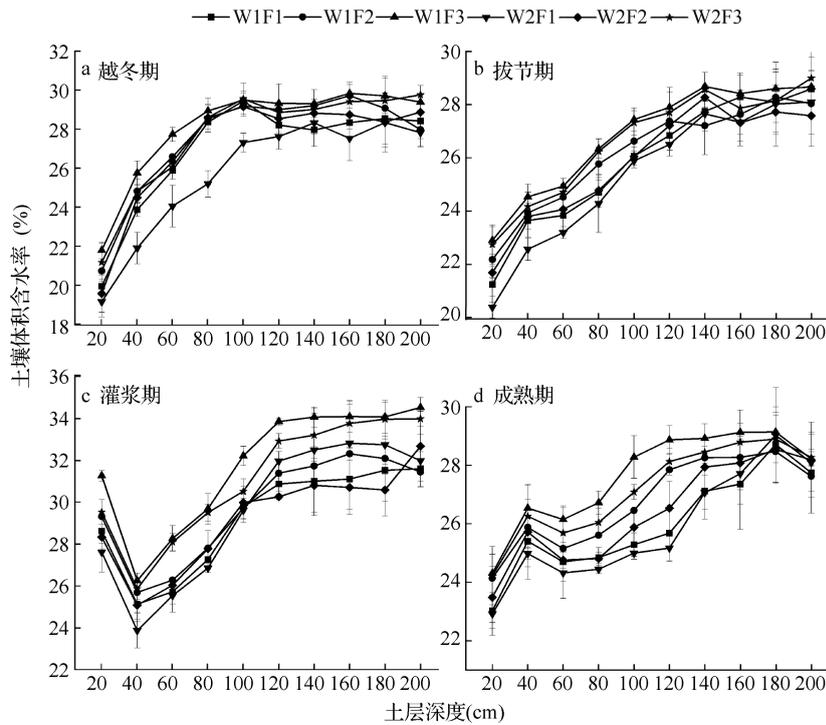


图5 有机无机肥配施与灌溉组合处理对冬小麦土壤体积含水率的影响

处理在 0 ~ 200 cm 土层平均土壤体积含水率分别为 27.03%、27.56%、28.62%、26.65%、27.17% 和 28.18%，表现为 W1F3> W2F3>W1F2> W2F2> W1F1>W2F1，说明在相同施肥条件下，充分灌溉较亏缺灌溉更有利于提高土壤体积含水率，其中 W1F3 处理较 W2F3 处理提高了 1.6%。在相同灌溉水平下，W1F2 和 W1F3 分别较 W1F1 处理土壤体积含水率提高了 2.0% 和 5.9%，W2F2 和 W2F3 处理分别较 W2F1 处理土壤体积含水率提高了 2.0% 和 5.7%。这表明有机无机肥配施对土壤的蓄水保水能力高于无机肥处理，且有机肥比例越高，蓄水保水能力越强。在两因素组合处理下，W1F3 和 W2F3 处理土壤体积含水率较其他处理分别提高了 3.8% ~ 7.4% 和 2.2% ~ 5.7%。在所有处理中，W1F3 处理的蓄水保水能力最强，W2F3 处理次之。

2.3 有机无机肥配施与灌溉组合处理对籽粒产量及水分利用效率的影响

由表 2 可知，施肥因素对冬小麦穗长、有效穗数、千粒质量和籽粒产量均有极显著影响，灌溉因素对冬小麦有效穗数和千粒质量有极显著影响，施肥和灌溉的组合处理对有效穗数有显著影响，对产量及其他性状无显著影响。表 2 显示，W2F1、W2F2 和 W2F3 处理籽粒产量较 W1F1、W1F2 和 W1F3 处理分别提高了 2.7%、1.2% 和 5.3%，但无显著性差异，可见在同一施肥水平下，亏缺灌溉比充分灌溉处理更有利于增加冬小麦的有效穗数和千粒质量，进而促进籽粒产量的增加。W1F3 和 W1F2 处理较 W1F1 处理籽粒产量分别提高了 28.6% 和 14.8%，W2F3 和 W2F2 处理较 W2F1 处理籽粒产量分别提高了 31.8% 和 13.1%，说明在同一灌溉水平下，有机无机肥配施能显著增加冬小麦穗长、有效穗数和千粒质量，从而提高产量。F3、F2、F1 有显著性差异且有机肥比例越高，提高效果越明显，所有处理中以 W2F3 处理籽粒产量最高 (9043.0 kg/hm²)，说明亏缺灌溉与 48% 有机肥和 52% 无机肥组合处理对冬小麦的增产效果最佳，较充分灌溉和无机肥组合处理的籽粒产量增加了 35.5%。

由表 3 可知，灌溉和施肥组合处理对 0 ~ 200 cm 土层末期贮水量无显著影响。在同一施肥水平下，与 W1 相比，W2 处理的 ET 较 W1 处理降低了 8.4% ~ 13.7%，且存在显著性差异。W2 处理 WUE 较 W1 处理提高了 2.3% ~ 14.0%，其中 W2F2 处理与 W1F2 差异显著。W1F2、W1F3 处理的 ET 较

表 2 有机无机肥配施与灌溉组合处理对冬小麦产量的影响

处理	穗长 (cm)	有效穗数 (个/m ²)	千粒质量 (g)	籽粒产量 (kg/hm ²)
W1F1	6.4c	481.7c	35.6e	6675.9c
W1F2	7.2b	513.5b	42.1e	7664.6b
W1F3	7.3b	526.7b	44.3b	8585.4a
W2F1	6.5c	483.4c	37.9d	6859.3c
W2F2	7.3b	519.3b	43.7bc	7757.8b
W2F3	7.7a	570.3a	47.4a	9043.0a
显著性	灌溉类型	NS	**	**
检验	施肥水平	**	**	**
(F 值)	灌溉类型 × 施肥水平	NS	*	NS

注：同列数据后的不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P \leq 0.05$)；* 表示有显著影响 ($P < 0.05$)，** 表示有极显著影响 ($P < 0.01$)，NS 表示无显著影响。表 3 同。

表 3 有机无机肥配施与灌溉组合处理对农田水分蒸散量及水分利用效率的影响

处理	降水量 (mm)	灌溉水量 (mm)	0 ~ 200 cm 土层		农田水分蒸散量 [kg/(hm ² ·mm)]	水分利用效率 [mm]
			初期贮水量 (mm)	末期贮水量 (mm)		
W1F1	213.1	120	576.8	519.5c	390.4a	17.1c
W1F2	213.1	120	593.2	535.2b	391.1a	19.6c
W1F3	213.1	120	613.0	552.3a	393.8a	21.8ab
W2F1	213.1	60	599.6	517.3c	355.4c	19.3c
W2F2	213.1	60	615.4	527.7b	360.8b	21.5b
W2F3	213.1	60	616.9	543.5a	346.5d	26.1a
显著性	灌溉类型			NS	**	**
检验	施肥水平			**	**	**
(F 值)	灌溉类型 × 施肥水平			NS	**	**

W1F1 处理增大，但差异不显著，说明有机无机肥配施处理较单施无机肥处理的冬小麦株高和叶面积指数增长较大，植株生长旺盛，需水量大。相同灌溉条件下，有机无机肥配施促进了土壤蓄水保水，提高了 WUE，且有机肥比例越高，WUE 越大。在充分灌溉条件下，W1F3 和 W1F2 处理的 WUE 较 W1F1 处理分别提高了 27.5% 和 14.6%，W1F3 与 W1F2、W1F1 处理差异显著。在亏缺灌溉下，W2F3 和 W2F2 处理的 WUE 较 W2F1 处理分别提高了 35.2% 和 21.4%，三者之间均存在显著差异。表 3 还表明，施肥和灌溉的组合作用对 ET 和 WUE 有极显著的影响。所有组合处理中以 W2F3 处理的 WUE 最高，较 W1F1、W1F2、W1F3、W2F1 和 W2F2 处理分别提高了 52.6%、33.2%、19.7%、35.2%

和 21.4%，说明亏缺灌溉与 48% 有机肥和 52% 无机肥组合处理对冬小麦 WUE 的影响最为显著。

3 讨论

3.1 亏缺灌溉对冬小麦生长、产量及水分利用效率的影响

灌溉能够减轻干旱胁迫对作物的抑制作用，并促进作物生长发育，进而达到增产的目的^[14]，亏缺灌溉作为一种有效的灌溉方式已被广泛应用^[15-16]。作物不同时期对水分的敏感度不同，在作物生长的适宜阶段进行适度的水分亏缺，能抑制作物某些方面的生长，可以使不同器官间的同化物重新分配，使其营养生长得到控制而促进生殖生长^[17]。本研究对陕西省关中地区的冬小麦实施有效的亏缺灌溉，是由于陕西省关中地区都是小麦—玉米轮作体系，在 9—10 月玉米成熟期降水量较多，更多的水分储存于土壤，为冬小麦种植提供了重要的水源。本研究表明在相同的施肥条件下，亏缺灌溉处理的冬小麦株高和叶面积指数均高于充分灌溉，亏缺灌溉并未明显影响作物的生长，亏缺灌溉复水后作物株高、叶面积指数都可以迅速恢复，达到甚至超过充分灌溉，说明亏缺灌溉较充分灌溉处理对冬小麦株高和叶面积指数的增长更为有效。这是因为亏水过程中植株体内因缺水受到抑制而积累的代谢产物，在重新复水后可以促进生长发育的相关过程，激发生长潜能，起到了补偿生长的效应^[18]。与充分灌溉相比，亏缺灌溉还可以优化冬小麦的干物质生长和分配，促进干物质的积累^[19]。本研究中，在同一施肥条件下亏缺灌溉处理冬小麦的干物质质量高于充分灌溉，在成熟期时 W2F3 处理的干物质质量比 W1F3 处理增加了 9.9%。同样，一定时期的适度亏缺也有利于产量及构成要素的提高^[20]。本研究表明，在同一施肥水平下，亏缺灌溉比充分灌溉更有利于增加冬小麦的有效穗数和千粒质量，进而促进籽粒产量的增加，同时还可以减小 ET，提高 WUE，有效节约了灌水量，这与马守臣等^[21]、Xue 等^[22]的研究结果相一致。

3.2 有机无机肥配施对冬小麦生长、产量及水分利用效率的影响

有机无机肥配施能够改善土壤物理性质，提高土壤含水量，促进作物生长^[23]。在本研究中，与单施无机肥处理（F1 处理）相比，有机无机肥配施处理（F2、F3 处理）具有较高的土壤蓄水能力和

土壤含水量。这是因为有机肥中的土壤改良剂优化了土壤团粒结构，增加了土壤团聚体的稳定性^[24]。同时有机无机肥配施还增加了土壤的保水保肥能力，抑制了土壤水分蒸发，提高了土壤的吸水能力，为植物生长提供了更大的水分供应^[25-26]。本研究表明，在同一灌溉水平下，有机无机肥配施处理冬小麦的株高、叶面积指数和干物质质量均显著高于无机肥处理。其中株高以 F2 处理最为显著，叶面积指数和干物质质量均表现为 F3>F2>F1。这说明有机无机肥配施提高了土壤含水量，维持了植株生长所需的水分，增加了植株株高和叶面积指数，从而促进了干物质的积累^[27-29]。有机无机肥配施还增加了冬小麦的产量，提高了冬小麦的 WUE^[30-32]。本研究中，有机无机肥配施对冬小麦穗长、有效穗数，千粒质量以及籽粒产量、ET 和 WUE 均有极显著影响。在同一灌溉水平下，有机无机肥配施处理的冬小麦籽粒产量与无机肥相比平均提高了 21.7% 和 22.5%，WUE 平均提高了 21.1% 和 28.5%。这是因为有机无机肥配施不仅克服了无机肥肥效慢、养分含量低的缺点，而且保证了作物生长后期的养分供应，有利于后期产量形成，提高了 WUE^[33]。本研究中，有机无机肥配施处理的 ET 高于单施无机肥处理，说明有机无机肥配施处理下冬小麦的株高和叶面积指数增长较大，生物量较高，耗水大。本研究表明，48% 有机肥 + 52% 无机肥配施能够满足冬小麦正常生长，且可获得最高产量和 WUE，这与井永萍^[34]等、Zhang 等^[35]的研究结果，即有机无机肥配施比例为 1:(2~3) 时，作物产量和 WUE 高于其他处理一致。

科学施肥和灌溉是我国陕西省关中地区作物生长发育的关键。与充分灌溉相比，亏缺灌溉能达到节水增产的效果^[36-37]；施肥可以显著提高作物产量。但在不同水分条件下施肥对作物的调控效应有很大差别^[38-39]。本研究结果表明，与充分灌溉和无机肥处理相比，亏缺灌溉和有机无机肥配施组合处理更有助于促进冬小麦的生长发育，提高籽粒产量和 WUE。这说明适度的亏缺灌溉和有机无机肥配施结合可发挥出二者的组合作用；在本试验的所有组合处理中，亏缺灌溉与 48% 有机肥 + 52% 无机肥配施对冬小麦的籽粒产量和 WUE 的提升效果最优。

4 结论

适度亏缺灌溉与有机无机肥配施相结合可发挥

其二者组合作用。本试验最佳的水肥管理模式为适度亏缺灌溉与48%有机肥+52%无机肥相结合,减少灌溉用水投入的同时降低无机肥的使用量,在水资源短缺地区可广泛应用。

参考文献:

- [1] 同延安, Emteryd O, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价 [J]. 中国农业科学, 2004, 37 (8): 1239-1244.
- [2] 王志勇, 红梅, 杨殿林, 等. 供氮水平和有机无机配施对夏玉米产量及土壤硝态氮的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2008 (6): 11-14.
- [3] 史常亮, 朱俊峰, 栾江. 农户化肥施用技术效率及其影响因素分析: 基于4省水稻种植户的调查数据 [J]. 农林经济管理学报, 2015, 14 (3): 234-242.
- [4] 李奔, 王贵彦, 陈召月, 等. 不同灌水条件下分层施肥对冬小麦产量和水分利用效率的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (3): 326-332.
- [5] 康爱林, 孟凡乔, 李虎, 等. 滴灌施肥对华北地区冬小麦-夏玉米作物产量及水氮利用效率的影响 [J]. 土壤通报, 2020, 51 (4): 958-968.
- [6] Nangia V, Turrall H, Molden D. Increasing water productivity with improved N fertilizer management [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2008, 2 (3/4): 193-207.
- [7] 杨忠赞, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 有机肥替代对土壤理化性状及产量的综合评价 [J]. 华北农学报, 2019, 34 (S1): 153-160.
- [8] 孟爱红, 荀贤玉, 杨宜生, 等. 有机肥不同比例替代化肥对大棚茼蒿生长的影响 [J]. 蔬菜, 2019 (11): 19-24.
- [9] Wei W L, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2016, 225: 86-92.
- [10] 孟兆江, 段爱旺, 高阳, 等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (12): 203-212.
- [11] 孟兆江, 段爱旺, 王晓森, 等. 调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (4): 99-104.
- [12] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16 (3): 24-27.
- [13] 银敏华, 李援农, 周昌明, 等. 调亏灌水和分蘖干扰对冬小麦生长的补偿效应 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (10): 3011-3019.
- [14] 张步舫, 黄高宝. 春小麦调亏灌溉对土壤氮磷钾的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2007, 26 (4): 45-48.
- [15] 史力超, 朱云, 翟勇, 等. 施氮对滴灌春小麦干物质积累、转运及产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2015, 35 (6): 844-849.
- [16] Jackson R B, Sperry J S, Dawson T E, et al. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions [J]. Trends in Plant Science, 2000, 5 (11): 482-488.
- [17] Eapen D, Barroso M L, Ponce G, et al. Hydrotropism: root growth responses to water [J]. Trends in Plant Science, 2005, 10 (1): 44-50.
- [18] 李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (4): 195-202.
- [19] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 等. 亏缺灌溉对冬小麦生理生态指标的影响及应用 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (5): 1086-1090.
- [20] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (1): 171-177.
- [21] 马守臣, 张绪成, 段爱旺, 等. 施肥对冬小麦的水分调亏灌溉效应的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (6): 139-143.
- [22] Xue Q, Musick J T, Dusek D A. Physiological mechanisms contributing to the increased water use efficiency in winter wheat under deficit irrigation [J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163 (2): 154-164.
- [23] 孔德宁, 康国栋, 李鹏, 等. 化肥减施条件下配施有机肥对旱地紫色土有机碳活性组分的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40 (4): 1073-1080.
- [24] Liu Q J, Shi Z H, Fang N F, et al. Modeling the daily suspended sediment concentration in a hyperconcentrated river on the Loess Plateau, China, using the Wavelet-ANN approach [J]. Geomorphology, 2013, 186: 181-190.
- [25] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007 (3): 411-416.
- [26] Farrell C, Ang X Q, Rayner J P. Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates [J]. Ecology Engineer, 2013, 52: 112-118.
- [27] 毛平平, 王丽, 张永清, 等. 施用有机肥条件下氮肥不同底追比对冬小麦干物质运转和籽粒产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016 (5): 50-54.
- [28] Mon J, Bronson K F, Hunsaker D J, et al. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, canopy temperature, and nitrogen use efficiency in overhead sprinkler-irrigated durum wheat [J]. Field Crops Research, 2016, 191: 54-65.
- [29] Rathore V S, Nathawat N S, Bhardwaj S, et al. Yield, water and nitrogen use efficiencies of sprinkler irrigated wheat grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region [J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 232-245.
- [30] 郑凤霞, 董树亭, 刘鹏, 等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氮挥发损失的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (3): 567-577.
- [31] 吕凤莲. 冬小麦/夏玉米轮作体系有机无机肥配施的农学和环境效应研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [32] Subehia S K, Sepehya S, Rana S S, et al. Long-term effect of organic and inorganic fertilizers on rice-wheat yield, and chemical properties of an acidic soil in the western Himalayas [J]. Experimental Agriculture, 2013, 49 (3): 382-394.

- [33] 史春余, 张夫道, 张树清, 等. 有机-无机缓释肥对番茄产量和氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004 (6): 584-587.
- [34] 井永苹, 李彦, 薄录吉, 等. 有机肥部分替代化肥对作物产量及土壤氮素迁移的影响 [J]. 山东农业科学, 2019, 51 (7): 48-54.
- [35] Zhang M, Dong B, Qiao Y, et al. Yield and water use responses of winter wheat to irrigation and nitrogen application in the North China Plain [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17: 1194-1206.
- [36] Li F S, Liang J H, Kang S Z, et al. Benefits of alternate partial root-zone irrigation on growth, water and nitrogen use efficiencies modified by fertilization and soil water status in maize [J]. Plant and Soil, 2007, 295: 279-291.
- [37] 苏秦. 有机培肥对宁南旱作农田土壤理化性状及作物生长的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [38] 闫世程. 冬小麦滴灌施肥水肥高效利用机制研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [39] 董昭芸. 沟垄集雨种植模式下施肥与补灌对冬小麦生长及水肥利用效率的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.

Effects of irrigation and organic fertilizer treatment on water use efficiency of winter wheat

LI Bin¹, SU Shun-shun², FENG Hao¹, WU Shu-fang^{1*}, HU Ya-jin¹, WANG Jian-ping³ (1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100; 2. Beijing Liangxiang Lanxin Water Conservancy Engineering Design Co., Ltd., Beijing 102488; 3. Yan'an Baota District Fruit Industry Bureau, Yan'an Shaanxi 716000)

Abstract: The effects of different irrigation amounts and combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat growth and water use efficiency were explored to provide reference for scientific fertilization management of winter wheat. Taking the winter wheat 'Xiaoyan 22' in Guanzhong area as the research object, through field experiments, the organic fertilizer and inorganic fertilizer were applied in different proportions (F1, 100% inorganic fertilizer; F2, 24% organic fertilizer+76% inorganic fertilizer; F3, 48% organic fertilizer+52% inorganic fertilizer) according to the principle of equal nitrogen, and 6 irrigation and fertilization combinations (W1F1, W1F2, W1F3, W2F1, W2F2 and W2F3) were designed in combination with two levels of irrigation (full irrigation W1 and deficit irrigation W2). By measuring the growth indicator (plant height and leaf area index) of winter wheat, soil volume moisture content in 0-200 cm soil layer (with a depth interval of 20 cm), wheat yield and its components (dry matter weight, panicle length, effective ear number, 1000 grain mass and grain yield), the effects of irrigation amount and organic and inorganic fertilizers on winter wheat growth and water use efficiency (WUE) were analyzed. The results showed that: (1) Under the condition of full irrigation (W1), the plant height of F2 and F3 treatments increased by 3.4%-21.2% and 0.8%-15.9%, the leaf area index increased by 5.7%-18.5% and 16.8%-47.4%, the dry matter weight increased by 12.1%-26.1% and 21.1%-36.0%, the panicle length increased by 12.5% and 14.5%, the effective ear number increased by 6.6% and 9.3%, the 1000-grain mass increased by 18.3% and 24.4%, the grain yield increased by 14.8% and 28.6%, and the WUE increased by 14.6% and 27.5%, respectively. Under the condition of deficit irrigation (W2), compared with F1 treatment, F2 and F3 treatment increased plant height by 8.5%-16.2% and 0.5%-10.6%, leaf area index by 4.9%-20.7% and 17.0%-50.0%, dry matter weight by 7.7%-25.7% and 15.0%-34.6%, panicle length by 12.3% and 18.5%, effective ear number by 7.4% and 18.0%, 1000-grain mass by 15.3% and 25.1%, grain yield by 13.1% and 31.8%, WUE by 21.4% and 35.2%, respectively. Combined application of organic and inorganic fertilizers improved the soil volume moisture content under the same irrigation level. (2) W2F2 treatment was the most effective on the growth of plant height of winter wheat, reaching the maximum value at the filling stage, being 10.4% higher than W1F1 treatment. W2F3 treatment had the greatest impact on the leaf area index, dry matter weight, panicle length, effective ear number and 1000-grain mass of winter wheat, and it was 23.6%, 39.0%, 20.3%, 18.4% and 33.1% higher than W1F1 treatment at the maturity stage, respectively. (3) The effect of W2F3 treatment on the grain yield and WUE of winter wheat was the most significant. Its grain yield was 35.5%, 18.0%, 5.3%, 31.8% and 16.6% higher than that of W1F1, W1F2, W1F3, W2F1 and W2F2 treatments, respectively; Compared with W1F1, W1F2, W1F3, W2F1 and W2F2, WUE of W2F3 treatment increased by 52.6%, 33.2%, 19.7%, 35.2% and 21.4%, respectively. The combination of deficit irrigation and 48% organic fertilizer+52% inorganic fertilizer had the highest yield and WUE of winter wheat. The irrigation and fertilization management plan laid the foundation for scientific fertilization management of winter wheat in the Guanzhong plain and similar environmental areas.

Key words: deficit irrigation; combined application of organic and inorganic fertilizer; winter wheat; output; water use efficiency