

# 灌水量对冬小麦产量和水分利用效率的影响

石学萍, 刘伊明, 王九明, 兰印超, 檀海斌\* (国家半干旱农业工程技术研究中心, 河北石家庄 050011)

**摘要** 为准确掌握限水条件下冬小麦高产高效的灌溉制度, 分析比较了 2019—2020 年(枯水年)冬小麦不同灌水量处理(127、172、217、262、315 mm)对土壤水分含量、作物产量构成因素指标及水分利用效率等指标的影响。结果表明, 随着灌溉量的增加, 冬小麦产量构成因素千粒重、穗粒数、穗数变化趋势较一致, 均为先增加后减少。当灌水量为 127~217 mm 时, 随着灌水量的增加, 千粒重、穗粒数、穗数显著增加; 当灌水量为 217~315 mm 时, 随着灌水量的增加, 千粒重、穗粒数、穗数呈缓慢减少的趋势, 但差异不显著。当小麦生育期灌水量 217 mm、春季关键期 3 次灌水、每次灌水 60 mm 时, 冬小麦产量和水分利用效率达到最高, 分别为 8 396.72 kg/hm<sup>2</sup> 和 19.19 kg/(hm<sup>2</sup>·mm)。

**关键词** 冬小麦; 灌水量; 产量; 水分利用效率

中图分类号 S512.1<sup>+</sup>1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)11-0051-02

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.11.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Effects of Irrigation Amount on the Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat

SHI Xue-ping, LIU Yi-ming, WANG Jiu-ming et al (National Engineering Research Center for Semi-Arid Agriculture, Shijiazhuang, Hebei 050011)

**Abstract** To accurately find out high-yield and high-efficiency irrigation system under water-limited condition in winter wheat, we compared the effects of five different irrigation amounts (127, 172, 217, 262, 315 mm) in 2019–2020 year on soil moisture content, crop yield component factors and water use efficiency. Results showed that with the increase of irrigation amount, yield component factors of 1 000-grain weight, grains per spike and ear number all increased firstly and then decreased. When irrigation amount was 127–217 mm, the 1 000-grain weight, grains per spike and ear number enhanced significantly. When irrigation amount was 217–315 mm, the 1 000-grain weight, grains per spike and ear number decreased slowly, but there were no significant differences. Under the conditions of 217 mm irrigation amount at growth period, 3 irrigation times at spring key period and 60 mm for each irrigation, the yield and water use efficiency of winter wheat reached the maximum values, which were 8 396.72 kg/hm<sup>2</sup> and 19.19 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), respectively.

**Key words** Winter wheat; Irrigation amount; Yield; Water use efficiency

河北省属于资源匮乏、地下水超采严重省份。地下水超采量和超采面积均为全国的 1/3, 是全国最大的地下水漏斗区。水资源总量从 1980 年的 236 亿 m<sup>3</sup> 下降到 2018 年的 157 亿 m<sup>3</sup>[1]。河北省是小麦主产省份之一, 小麦种植面积占河北省的 40% 以上[2]。但由于自然降雨分布不均, 高耗水作物小麦生产主要依靠地下水灌溉。水资源缺乏是限制该区域小麦生产的重要因素。科研工作者在如何合理利用有限的农业水资源来实现小麦生产节水、稳产, 提高小麦水分利用效率和灌溉水利用效率方面做了大量的研究[3-7]。鉴于此, 通过土壤水分和作物生长发育状况的原位观测, 笔者分析比较了小麦在不同限量下的产量构成因素、作物产量及水分利用效率等指标, 揭示不同限量对小麦产量、水分利用效率的影响规律, 旨在为河北省制定冬小麦节水高产的灌溉制度提供试验依据。

## 1 材料与与方法

**1.1 试验地概况** 试验在河北省石家庄市国家半干旱农业工程技术研究中心鹿泉综合试验基地进行。试验田土壤类型为砂壤土。播种前试验田 0~20 cm 土层土壤含有有机质 10.4 g/kg, 碱解氮 76.48 mg/kg, 速效磷 8.67 mg/kg, 速效钾 105.50 mg/kg。

**1.2 试验材料** 试验采用小麦品种为邢麦 13 号, 适宜在冀中南高水肥地块种植。

**1.3 试验设计** 地面全塑软带快接喷灌系统, 该系统工作压力在 0.2~0.3 MPa, 喷射距离 8 m, 适用于各种地块形式, 而且操作简单方便、便于拆卸, 喷带之间的间距大, 不影响耕作。通过地面全塑软带快接喷灌进行试验, 漫灌为对照。试验共设 5 个处理, 具体试验方案见表 1。

## 1.4 测定项目与方法

**1.4.1 土壤含水量的测定。** 沿全塑软带在喷头正下方布设采样点, 各测点距离 2 m。用土钻取 0~200 cm 土层的土, 每 20 cm 为 1 层, 样品取后立即装入铝盒, 110 °C 烘干至恒重, 计算土壤含水量。计算公式为 SWC=(M1-M2)/M2×100%。

**1.4.2 农田耗水量的计算。** 采用测定土壤含水量来计算作物耗水量的方法, 耗水量的计算公式为  $ET_{1-2} = 10 \sum \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。式中,  $ET_{1-2}$  为阶段耗水量;  $i$  为土层编号;  $n$  为总土层数;  $\gamma_i$  为第  $i$  层土壤干容重;  $H_i$  为第  $i$  层土壤厚度;  $\theta_{i1}$  和  $\theta_{i2}$  分别为第  $i$  层土壤时段初和时段末的含水量, 以占干土重的百分数计;  $M$  为该时段内的灌水量;  $P_0$  为该有效降水量;  $K$  为该时段内的地下水补给量, 由于试验地区地下水埋深大于 15 m, 因此计算中  $K$  值可以不计。

**1.4.3 水分利用率的计算。** 水分利用率的计算公式为  $WUE = Y/ET\alpha$ 。式中,  $WUE$  为水分利用率,  $Y$  为籽粒产量,  $ET\alpha$  为小麦生育期间耗水量。

**基金项目** 河北省重点研发计划项目(1922700); 河北省平原粮食规模化生产科技示范工程项目。

**作者简介** 石学萍(1979—), 女, 唐山乐亭人, 高级农艺师, 硕士, 从事作物农艺节水研究。\* 通信作者, 研究员, 从事农田水利研究。

**收稿日期** 2020-11-20

表1 冬小麦不同处理灌水量的比较

Table 1 Comparison of the irrigation amount of different treatments of winter wheat

处理编号 Treatment code	灌溉方式 Irrigation method	封冻水 Freezing water//mm	拔节期 Jointing stage//mm	扬花期 Flowering period//mm	灌浆期 Filling stage//mm	全生育期 Whole growth period//mm
T1	全塑软带快接喷灌	37	30	30	30	127
T2	全塑软带快接喷灌	37	45	45	45	172
T3	全塑软带快接喷灌	37	60	60	60	217
T4	全塑软带快接喷灌	37	75	75	75	262
CK	漫灌	45	90	90	90	315

1.5 数据分析 采用 SPSS 17.0 软件进行方差分析和显著性测验;采用 LSD 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

2.1 不同处理对冬小麦及产量构成因素的影响 由表 2 可知,随着灌水量的增加,千粒重呈先增加再减少的趋势,各处理千粒重由大到小的顺序依次为 T3 处理>T4 处理>CK>T2 处理>T1 处理。其中,T3、T4 处理的千粒重比对照漫灌处理分别提高 3.19%、0.92%。方差分析显示,当灌水量在 127~217 mm 时,千粒重随着灌水量的增加有显著差异;当灌水量在 217~315 mm 时,千粒重随灌水量增加而减少,但无显著差异。

表2 不同处理对冬小麦产量构成因素的影响

Table 2 Effects of different treatments on the yield component factors of winter wheat

处理编号 Treatment code	千粒重 1 000-grain weight//g	穗数 Ear number 万/hm <sup>2</sup>	穗粒数 Grains per spike//个
T1	37.76 c	579.33 c	20.97 b
T2	42.00 b	628.52 b	25.78 ab
T3	46.96 a	647.47 a	29.28 a
T4	45.93 a	657.11 a	28.11 a
CK	45.51 a	665.61 a	27.47 a

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level

穗数整体上随着灌水量的增加而增加,各处理穗数由高到低依次为 CK>T4 处理>T3 处理>T2 处理>T1 处理。其中,对照漫灌处理穗数最高。穗数是由生育前期的分蘖数目及后期水肥、密度等原因决定,在冬小麦生育期保证一定灌水量增加有利于小麦分蘖的增加<sup>[8]</sup>。随着灌水量的增加,

表3 不同处理对冬小麦水分利用效率的影响

Table 3 Effects of different treatments on the water use efficiency of winter wheat

处理编号 Treatment code	灌水量 Irrigation amount mm	土壤耗水量 Soil water consumption mm	降雨量 Precipitation mm	总耗水量 Total water consumption//mm	产量 Yield/kg/hm <sup>2</sup>	水分利用效率 Water use efficiency kg/(hm <sup>2</sup> ·mm)
T1	127	165.06	87.58	379.64	5 641.54 c	14.86 c
T2	172	145.34	87.58	404.92	7 433.54 b	17.87 b
T3	217	132.87	87.58	437.45	8 396.72 a	19.19 a
T4	262	124.75	87.58	474.33	8 156.93 a	17.20 b
CK	315	108.57	87.58	511.15	7 612.00 b	14.89 c

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercases in the same column indicated significant differences at 0.05 level

## 3 结论与讨论

该研究在河北省山前平原进行,该地区冬小麦全生育期耗水量为 450 mm 左右<sup>[10-11]</sup>,冬小麦生育期降水量为 60~

T1、T2、T3 处理的穗数变化显著;但随着灌水量的继续增加,T3、T4、CK 处理的穗数虽然增加但差异不显著。

穗粒数随着灌水量的增加呈先增加后减少的趋势,各处理穗粒数由高到低依次为 T3 处理>T4 处理>CK>T2 处理>T1 处理。其中,T3 处理的穗粒数高于漫灌处理 6.59%,两者差异不显著。与 T1 处理相比,T3 处理的每穗粒数增加 39.62%,两者差异显著,说明随着灌水量的增加,冬小麦穗粒数先增加,至平缓后又呈降低的趋势。

2.2 不同处理对冬小麦水分利用效率的影响 由表 3 可知,冬小麦整个生育期各处理耗水总量从大到小依次为 CK>T4 处理>T3 处理>T2 处理>T1 处理。其中,T3 处理总耗水量达到 437.45 mm,比对照漫灌处理低 73.70 mm;T1、T2、T4 处理总耗水量分别为 379.64、404.92、474.33 mm,比对照分别低 131.51、106.23、36.82 mm。这说明随着灌溉量的增加,土壤浅层含水量较高,促进小麦根系生长,作物整个生育期总消耗水增加。

从表 3 可以看出,随着灌水量的增加,T1、T2、T3 处理的产量依次提高,其中 T3 处理产量达到最高。T1、T2、T3 处理的冬小麦产量分别为 5 641.54、7 433.54、8 396.72 kg/hm<sup>2</sup>。之后随着灌水量的增加,T3 处理、T4 处理和 CK 冬小麦产量反而减少。方差分析显示,T3 处理的产量显著高于 CK,这与张喜英等<sup>[9]</sup>的研究结果一致,他们指出在一定范围内增加冬小麦的灌水量具有增产作用,但灌水量过多会导致籽粒产量显著降低。

各处理的水分利用效率从大到小依次为 T3 处理>T2 处理>T4 处理>CK>T1 处理,因此 4 种节水处理水分利用效率均高于对照漫灌处理。其中,T3 处理水分利用效率最高,高于对照 28.88%,T2、T4 处理分别高于对照 20.01%、15.51%。

150 mm<sup>[12]</sup>,不能满足生长发育需求,大水漫灌不仅造成水资源浪费,而且降低产量和水分利用效率。调控冬小麦生育关  
(下转第 71 页)

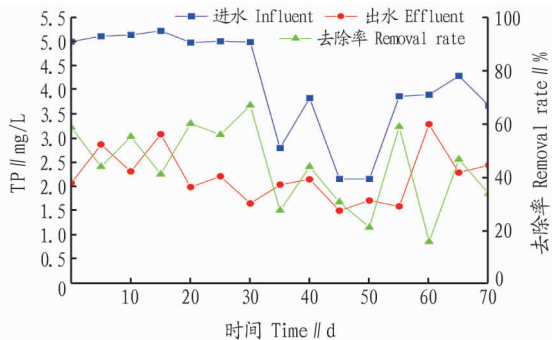


图 15 基于竹纤维填料的一体化脱氮除磷生活污水中试装置对 TP 的去除效果

Fig. 15 TP removal effect of the integrated nitrogen and phosphorus removal domestic sewage pilot plant based on bamboo fiber filler

70.78%;装填混合填料的装置对 TP 的去除效果最好,其出水均值浓度为 1.88 mg/L,相应的平均去除率达 57.84%。

(2)中试试验中出水 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的均值分别为 50.73、11.03、13.10 和 1.59 mg/L,相应的平均去除率分别为 86.51%、59.53%、61.57%和 43.92%,可大幅度消减污染物浓度,出水满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标

(上接第 52 页)

键期灌水量并不断促进或抑制小麦的生长发育,是降低小麦生育期耗水和提高水分利用效率的有效方法。冬小麦生育期间(2019年10月—2020年6月)降雨 87.58 mm,为枯水年<sup>[13]</sup>。随着灌溉量增加,冬小麦产量构成因素千粒重、穗粒数、穗数变化影响趋势较一致,均先增加后减少。当灌水量为 127~217 mm 时,随着灌水量的增加,千粒重、穗粒数、穗数增加且差异显著,但灌水量为 217~315 mm 时,随着灌水量的增加,千粒重、穗粒数、穗数缓慢减少,但差异不显著。从产量和水分利用效率来看,整个生育期灌水量在 217 mm 时,产量最高,达到 8 396.72 kg/hm<sup>2</sup>;水分利用效率也达到最高,为 19.19 kg/(hm<sup>2</sup>·mm),相比其他处理实现了冬小麦的高产和高效生产。因此,该试验结果主要反映了该地区干旱年份小麦产量、水分利用效率随灌水量的变化规律。水分作为小麦高产的基本保证之一,大量的水分进入田间如不能被小麦充分吸收利用,反而会增大水分蒸发,从而降低灌溉水分的利用效率。

#### 参考文献

- [1] 河北省水利厅. 2018 年河北省水资源公报[R]. 石家庄, 2018.
- [2] 马俊永,李科江,曹彩云,等. 河北低平原春季不同灌溉量对小麦产量

准》DB 33/973—2015 一级标准。

#### 参考文献

- [1] 苗伟红. 人工湿地填料处理污水的试验研究[D]. 南京:河海大学, 2006.
- [2] 李亚. 新型自通风的生物滤床-潜流人工湿地耦合系统强化处理农村生活污水中试对比研究[D]. 金华:浙江师范大学, 2017.
- [3] 王睿,李亚,梅荣武. 一体化成套技术在农村生活污水中的应用研究[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(2): 14-17.
- [4] 周菁. 引滦水生物预处理工艺及有机物降解机理研究[D]. 天津:天津大学, 2002.
- [5] 蒋涛,李亚,盛安志,等. 农村生活污水治理模式与技术研究综述[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(4): 79-83.
- [6] 李亚,孔令为,张义,等. 人工湿地技术低温运行效果及对策[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(17): 195-197.
- [7] 王君雅. 人工湿地基质脱氮除磷性能试验研究[D]. 桂林:桂林理工大学, 2010.
- [8] 陈克玲. 水库微污染水源地处理技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2003.
- [9] 李林锋,吴小凤. 天然牡蛎壳对磷吸附特性试验研究[J]. 三峡环境与生态, 2011, 33(6): 1-4, 8.
- [10] 成国栋. 改性聚氨酯填料的生物膜附着性能及废水处理特性研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [11] 刘耀兴. 牡蛎壳填料曝气生物滤池处理城市生活污水的实验研究[D]. 厦门:厦门大学, 2008.
- [12] 杨俊. 不同级配基质对人工湿地处理生活污水效果的影响研究[D]. 南昌:南昌大学, 2015.
- [13] 彭锦玉. 厌氧氨氧化塔式生物滤池脱除 NO 研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.

的影响趋势研究[J]. 河北农业科学, 2008, 12(3): 13-15, 18.

- [3] 余四平,冯伟森,袁灵红,等. 灌水次数对旱地小麦产量及品质的影响[J]. 山西农业科学, 2015, 43(3): 283-286, 292.
- [4] 冯诚,代俊峰,方小宇,等. 不同水分处理条件下小麦需水规律研究[J]. 节水灌溉, 2017(3): 18-20.
- [5] 杜娟娟,李粉婵,王仰仁. 限水灌溉下冬小麦最佳灌溉施肥制度研究[J]. 节水灌溉, 2017(12): 17-21.
- [6] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrigation science, 2008, 27(1): 1-10.
- [7] 热合木·亚合亚,马合木江·艾合买提,叶尔宝拉提·阿帕克,等. 不同灌溉定额对滴灌小麦产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(23): 241-243, 262.
- [8] 郭增江,于振文,石玉,等. 不同土层测墒补灌对小麦旗叶光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(4): 731-738.
- [9] ZHANG X Y, PEI D, HU C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. Irrigation science, 2003, 21(4): 159-166.
- [10] 王淑芬,张喜英,裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 27-32.
- [11] LIU C M, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and forest meteorology, 2002, 111(2): 109-120.
- [12] 董志强,张丽华,李谦,等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 725-733.
- [13] 闫鹏,陈源泉,张学鹏,等. 河北低平原区春玉米一熟替代麦玉两熟制的水生态与粮食安全分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1491-1499.