

不同灌溉控制指标对冬小麦生长及耗水特性的影响

雷媛^{1,2}, 刘战东^{1*}, 张伟强³, 黄超^{1,2}, 段爱旺^{1*}, 娄和⁴, 刘祖贵¹

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所/农业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. 河南省科学技术发展战略研究所, 郑州 450003;
4. 河南威盛电器有限公司, 河南 新乡 450001)

摘要:【目的】探究冬小麦适宜的计划湿润层深度和土壤含水率控制下限的组合模式, 为冬小麦田间用水管理及自动灌溉控制决策提供理论依据。【方法】以冬小麦为研究对象, 采用大田试验, 设置 3 个土壤含水率控制下限 (L: 40%, M: 50%, H: 60%) 和 3 个计划湿润层深度 (60、80、100 cm), 共 9 个处理 (T60L、T60M、T60H、T80L、T80M、T80H、T100L、T100M、T100H), 研究了不同计划湿润层深度与土壤含水率控制下限对华北地区冬小麦生长发育和水分利用的影响。【结果】计划湿润层深度及土壤含水率控制下限的不同改变了处理间灌水定额及灌水次数, 计划湿润层深度过高或土壤含水率控制下限过低均不利于冬小麦植株的生长发育。随着计划湿润层深度 (60~100 cm) 和土壤含水率控制下限 (40%~60%) 的增大, 冬小麦花前及花后的干物质累积量呈先增大后减小的趋势。产量随土壤含水率控制下限增高呈增加趋势, 当计划湿润层深度为 80 cm 时, 产量相对最高, 同时耗水量也越多, 而计划湿润层深度为 60 cm 时耗水量最少。计划湿润层深度越低, 土壤含水率控制下限越高, 冬小麦水分利用效率则越高。T60H 处理的水分利用效率最大, 为 19.96 kg/(hm² mm), 比最小值 T100L 大 21.0%。【结论】本试验条件下, 计划湿润层深度为 60 cm, 土壤含水率控制下限设置为土壤有效含水率的 60% 时, 冬小麦节水高产效果相对最优。

关键词: 冬小麦; 干物质; 计划湿润层深度; 土壤含水率; 产量

中图分类号: S274

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020565

OSID:



雷媛, 刘战东, 张伟强, 等. 不同灌溉控制指标对冬小麦生长及耗水特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 8-15.
LEI Yuan, LIU Zhandong, ZHANG Weiqiang, et al. The Effects of Criteria Used in Irrigation Control on Growth and Water Consumption of Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 8-15.

0 引言

【研究意义】20 世纪 60 年代以来, 黄淮海地区出现了气温升高、降水减少的气候演变趋势, 水资源短缺已成为制约该地区农业生产可持续发展的主要原因^[1-2], 但该地区灌溉水有效利用率低, 水资源浪费严重^[3]。如何在保障作物高产的前提下大幅度减少农业用水量, 实现作物高产与节水的协同, 是缓解农业用水短缺与粮食持续稳产高产矛盾的关键^[4]。

【研究进展】冬小麦是华北地区主要粮食作物之一, 灌溉是保障冬小麦高产、稳产的主要农田管理措施之一^[5-6], 对于提高冬小麦灌溉水利用效率尤其是优化冬小麦灌溉控制指标的研究, 国内外已经开展了大量的工作^[6-10], 主要包括适宜灌溉水量的确定^[7-8]以及在生育期内灌水量的合理分配^[9-11]。李晓航等^[12]

发现在冬小麦的需水关键期 (拔节期、开花期) 将 0~80 cm 土壤墒情保持在田间持水率的 75% 为较佳灌水处理; 金修宽等^[13]发现在冬小麦拔节期、开花期将 0~40 cm 土层土壤质量含水率保持在田间持水率的 60% 为冬小麦最优的节水、高产组合。此类试验本质上都可通过控制不同生育期计划湿润层深度和土壤含水率控制上、下限指标来对土壤有效含水率 (AWC) 进行调控^[14-16]来实现。AWC 是指土壤一定深度内能够贮藏并能被植物利用的水, 灌溉的主要目的就是为了补充土壤中 AWC 被消耗掉的部分, 在实际生产中一般采用土壤作物根系层易被直接吸收的有效水量 (RAW) 来制定灌溉制度, RAW 与土壤性质、计划湿润层深度以及植物发生水分胁迫之前能从根系层中消耗的水量占土壤总有效水量的比例相关^[17-18], 所以 RAW 值的大小要同时受到计划湿润层深度和选定的土壤含水率控制上下限的共同影响^[19]。

【切入点】目前许多针对冬小麦灌溉制度的研究只是将土壤含水率控制下限作为研究对象, 把计划湿润层深度设为某一定值来开展研究, 忽略了 2 个因子交互作用对 RAW 的影响。因此对于适宜的土壤含水率控制下限及计划湿润层深度组合需要进一步探究。

【拟解决的关键问题】通过控制土壤含水率控制下限

收稿日期: 2020-10-14

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-03); 国家自然科学基金项目 (51679242); 中央级科研院所基本科研业务费专项 (FIRI202001-03, FIRI2017-03); 公益性行业科研专项 (201503117)

作者简介: 雷媛 (1996-), 女。硕士研究生, 主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: leiyuan628@163.com

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

刘战东 (1981-), 男。副研究员, 主要从事作物水分生理与高效用水研究。E-mail: lzddragon@163.com

和计划湿润层深度，使作物处于对应的土壤水分条件下，研究其对冬小麦灌水次数、灌水定额和产量、水分利用效率等的影响，探究节水稳产的灌溉控制指标组合，为高效灌水技术推广和现代化农业发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 10 月—2019 年 6 月在中国农业科学院农田灌溉研究所七里营试验基地进行。试验区位于华北平原河南省新乡市新乡县七里营镇（东经 113°54′、北纬 35°18′，海拔 84 m），属于典型的暖温带半湿润半干旱地区，年平均降水量 582 mm，其中 6—10 月降水量占全年降水量的 70%~80%；年平均气温 14 ℃，年日照时间 2 399 h，无霜期 210 d，年潜在蒸散量 2 000 mm。土壤类型为潮土，质地为轻砂壤

土，试验区土壤 pH 值为 8.8，地下水埋深大于 5 m，在华北平原南部地区具有较好的代表性。生育期降水总量为 92.5 mm。表 1 为试验点土壤物理参数，其中土壤粒径采用 BT-9300HT 型激光粒度分析仪测定，田间持水率采用田测法测定，凋萎系数采用高速离心法测定，土壤体积质量和土壤饱和含水率通过环刀法测定。

1.2 试验材料与方法

试验设置计划湿润层深度和土壤含水率控制下限 2 个因素，其中计划湿润层深度因素设置 60 cm（T60）、80 cm（T80）和 100 cm（T100）3 个水平，土壤含水率控制下限因素设置为土壤有效含水率（AWC）的 40%（L）、50%（M）、60%（H），采用双因子随机区组设计，合计 9 个处理，每个处理重复 3 次（表 2）。

表 1 试验点土壤物理参数

Table1 Soil physical parameters of the test site

土壤深度/cm	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	凋萎系数/ (cm ³ cm ⁻³)	田间持水率/ (cm ³ cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ cm ⁻³)	体积质量/ (g·cm ⁻³)
0~20	6.75	69.72	23.53	0.16	0.34	0.45	1.56
20~40	6.41	66.91	26.69	0.16	0.32	0.40	1.58
40~60	10.19	69.96	19.85	0.18	0.32	0.42	1.54
60~80	10.16	73.44	16.41	0.18	0.30	0.36	1.42
80~100	8.22	75.74	16.05	0.17	0.31	0.38	1.45

表 2 试验设计

Table2 Experimental design

计划湿润层深度	土壤含水率控制下限		
	L (40%)	M (50%)	H (60%)
T60 (60 cm)	T60L	T60M	T60H
T80 (80 cm)	T80L	T80M	T80H
T100 (100 cm)	T100L	T100M	T100H

注 当计划湿润层的土壤含水率达到设定的土壤含水率控制下限后，即将计划湿润层土壤含水率补灌到田间持水率。

每个处理小区面积为 10 m×30 m=300 m²，处理间设置隔离带 2 m。采用微喷灌方式灌溉，当计划湿润层深度的平均土壤含水率下降至设定的土壤含水率控制下限时，即开始实施灌溉，到计划湿润层灌至田间持水率时停止，灌水量用水表计量。

研究对象为冬小麦，品种为周麦 22，2018 年 10 月 15 日播种，翌年 6 月 7 日收获。播种量均为 225 kg/hm²，种植行距为 20 cm。播种前所有处理都基施缓控尿素 300 kg/hm²，复合肥 750 kg/hm²，其他时期不再施肥。在冬小麦全生育期中，各处理除设计的试验因素不同外，其他田间栽培管理措施均保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水率

土壤含水率采用“智墒”土壤水分原位监测仪器（东方智感科技股份有限公司）测定。每隔 10 cm 布置探头，监测深度至土壤表层下 100 cm，时间间

隔为 1 h。

1.3.2 作物耗水量计算

冬小麦耗水量运用水量平衡法计算：

$$ET_i = \Delta W + I + G + P - D - R, \quad (1)$$

式中： ET_i 为作物各生育阶段耗水量（mm）； ΔW 时段内土壤储水量变化（mm）； I 为时段内的灌水量（mm）； G 为时段内地下水补给量（mm）； P 为时段内有效降雨量（mm）； D 为时段内深层渗漏量（mm）； R 为地表径流量（mm）。试验区域地下水的补给量可忽略不计，观测作物生育期内降雨和灌水没有形成明显径流，深层渗漏量依据 $D = M_0 + H_i - M_t$ 来推算^[20]， M_0 、 H_i 、 M_t 分别为 90~100 cm 土层在灌水或降雨前的初始体积含水量（mm）、灌水或降雨后水分增量（mm）及田间持水量（mm）。故式（1）可简化为：

$$ET_i = \Delta W + I + P - D. \quad (2)$$

1.3.3 籽粒产量

小麦成熟后，每个小区随机选取 2 m²（1 m×2 m）为样本，籽粒自然风干后称质量。每处理重复 3 次，换算成单位面积产量。

1.3.4 生长发育调查

从播种后第 170 天开始，每隔 10 d 观测株高、叶面积、生物量等生长发育指标。随机取可代表整体趋势的 10 株样本，利用精度为 1 mm 刻度的直尺测量各处理株高（地上部分底部到顶端），冬小麦的叶面积指数采用冠层分析仪测量。

生物量每隔 10 d 采样 1 次, 取冬小麦地上部分
 杀青、烘干后称质量。小麦成熟后, 每个小区随机选
 取 2 m² (1 m×2 m) 为测产样本, 籽粒自然风干后称
 质量计产。每处理重复 3 次, 换算成单位面积产量

1.3.5 水分利用效率 (Water Use Efficient, WUE)

水分利用效率利用计算式:

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

式中: WUE 为水分利用效率 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ mm})$); Y 为
 籽粒产量 (kg/hm^2); ET 为耗水量 (mm)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据处理;
 利用 OringinPro 2017 软件进行图表的绘制; 采用
 SPSS 25 计算各处理的统计特征值; 利用 Duncan's 新
 复极差法 (SSR) 进行差异性检验 ($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理灌水情况

不同处理的灌水定额、灌水次数、灌水时间及灌
 水总量如图 1 所示。同一土壤含水率控制下限, 灌水
 定额与计划湿润层深度呈正比, T100 处理灌水定额
 比 T80 处理增大了 25.0%, T100 处理比 T60 处理增大
 了 66.7%; 同一计划湿润层深度, 灌水定额与土壤含
 水率控制下限呈反比, H 处理比 M 处理的灌水定额减
 少了 21.1%, H 处理比 L 处理减少了 37.5%。灌水定
 额越小, 灌水次数越多, T60H 和 T80H 处理的灌水次
 数最多为 4 次。总灌水量受灌水定额和灌水次数共同
 影响, 9 个处理间 T80H 和 T100L 处理总灌水量最大,
 为 240 mm; T60L 处理总灌水量最小, 为 144 mm。

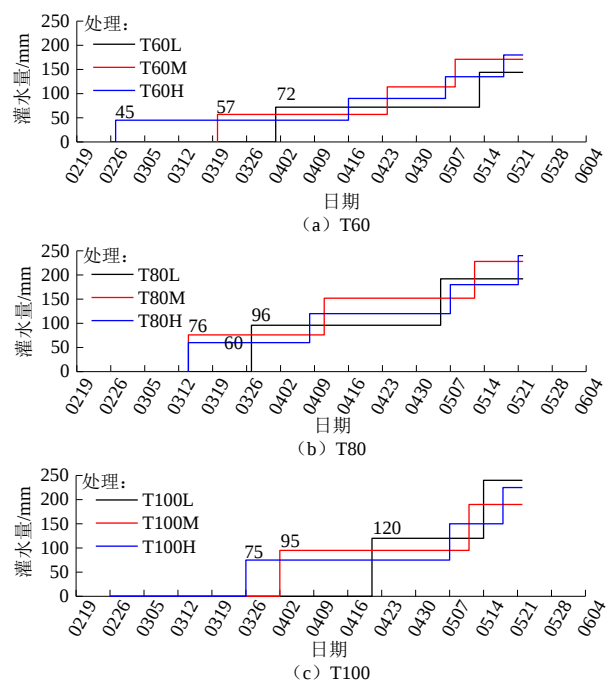


图 1 不同处理灌水定额、灌水次数及灌水总量

Fig.1 Irrigation water quota, irrigation times and total
 amount of irrigation water of each treatments

2.2 不同水分处理土壤水分动态变化

各处理土壤含水率动态变化情况如图 2 所示。生
 育后期有 3 次大于 15 mm 的降水。各处理由于灌水
 定额及灌水时间的差异, 自播种 130 d 之后土壤贮水
 量发生明显差异 ($P<0.05$)。播种 137 d 后, T60H 处
 理率先到达其对应的土壤含水率控制下限, 对其补灌
 到对应的灌水定额 (45 mm) 使土层 60 cm 的平均土
 壤含水率到达田间持水率。T60L 处理和 T100M 处理
 首次到达对应的土壤含水率控制下限时已是播种后
 第 171 天。各处理的灌水时间在播种后第 200 天至
 220 天的次数占总灌水次数的比例高达 52.0%。与图
 1 灌水情况相对应, 同一土壤含水率控制下限 (40%~
 60%), 计划湿润层深度越深 (60~100 cm), 处理越
 迟抵达其对应的土壤含水率控制下限, 且对应的灌水
 次数越少、灌水定额越大; 同一计划湿润层深度 (60~
 100 cm), 其土壤含水率控制下限设置越高 (40%~
 60%), 灌水次数越多, 灌水定额越小。此外, 在冬
 小麦收获期, 不同计划湿润层深度 H 处理的土壤贮水
 量均最大, H 处理较 M 处理土壤贮水量平均增大 7.7%,
 较 L 处理大 15.0%。

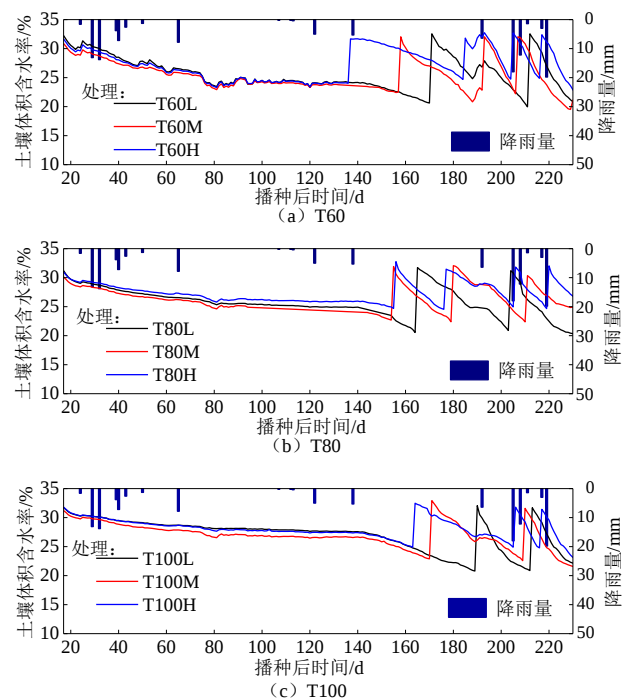


图 2 不同处理间土壤含水率均值动态变化

Fig.2 The mean value of soil water changed

dynamically between different treatments

2.3 不同处理株高、叶面积指数

由图 3 可知, 各处理叶面积指数 (LAI) 变化趋
 势一致, 呈先增大后减少的趋势, 播种 180 d 后进入
 快速生长期, 播种 220 d 后, 植株生长基本停止, 叶
 片萎焉, LAI 值明显降低。不同灌水处理对冬小麦 LAI
 和株高产生一定影响, 在播种后 220 d 左右 LAI 达到
 最大, 具体表现为 T60 处理=T80 处理>T100 处理, H
 处理=M 处理>L 处理, 其中 T60 处理和 T80 处理 LAI

值较 T100 处理增大了 8.3%~13.4%，H 处理和 M 处理 LAI 值较 L 处理增大了 7.2%~8.3%。最终 9 个处理中 T80M 的 LAI 相对最大，最大值达到了 5.34。各处理间株高变化趋势一致，在播种 210 d 之后增长趋势变缓。

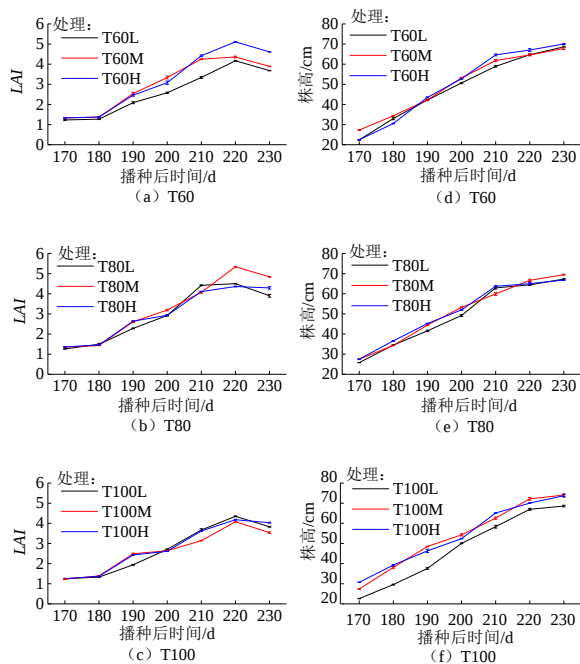


图 3 不同处理株高及叶面积指数变化

Fig.3 The changes of plant height and leaf area index between different treatments

2.4 不同处理干物质累积情况

由表 3 可知，不同处理间计划湿润层深度和土壤含水率控制下限交互作用会对冬小麦花前及花后的干物质转运和积累产生显著影响 ($P<0.05$)，但计划湿润层深度间和土壤含水率控制下限间差异不显著 ($P>0.05$)。9 个处理花前干物质累积量表现为 T80H 处理和 T80M 处理最大，T60L 处理最小，最大值与最小值之前差异达到 29.5%，花后干物质累积量表现为 T80M 处理最大，达到了 85 272.67 kg/hm²，其次为 T80H 处理，T60L 处理最小，值为 52 020.33 kg/hm²，最大和最小值之间的差异达到 39.0%。因此，随计划湿润层深度 (60~100 cm) 和土壤含水率控制下限 (40%~60%) 的增大，冬小麦花前及花后的干物质累积量呈先增大后减小的趋势。

2.5 不同处理产量构成、耗水量及水分利用效率

表 4 为不同处理下的冬小麦产量构成、耗水量及水分利用效率。由表 4 可知，计划湿润层深度和土壤含水率控制下限及其交互作用对于冬小麦穗数的影响不显著 ($P>0.05$)，而对于穗粒数、千粒质量、产量、耗水量及水分利用效率均有显著影响 ($P<0.05$)。

不同处理间穗粒数表现为 H 处理>M 处理>L 处理，T80 处理>T100 处理>T60 处理，L 处理和 M 处理的穗粒数较 H 处理分别少 5.9%、1.3%，T80 处理和 T100 处理的穗粒数较 T60 处理分别多 1.8%、0.6%。

T80H 处理和 T100H 处理的穗粒数最多，T100L 处理和 T60L 处理的穗粒数最少，其差异在 6.9%~7.8% 之间。可见，土壤含水率控制下限为 60% 时，穗粒数相对较多，而计划湿润层深度比土壤含水率控制下限对穗粒数的影响小。

表 3 不同处理下冬小麦干物质累积情况

Table 3 Dry matter accumulation of winter wheat

under different treatments		kg/hm ²
处理	花前干物质累积量	花后干物质累积量
T60L	10 288.00±213.67i	52 020.33±18.11i
T60M	13 441.00±334.02d	58 159.00±565.72e
T60H	11 968.67±463.42f	83 163.00±302.35b
T80L	11 864.00±179.39fg	59 608.67±500.40d
T80M	14 184.67±329.49ab	85 272.67±636.08a
T80H	14 591.00±381.40a	57 479.67±482.29ef
T100L	13 825.67±59.51bc	60 674.33±639.50c
T100M	11 271.33±320.33h	56 550.00±603.18g
T100H	12 718.00±269.26e	54 274.67±346.97h
T60	11 899.22±1 288.14	64 447.44±13 469.10
T80	13 546.56±1 201.26	67 453.67±12 629.88
T100	12 605.00±1 045.86	57 166.33±2 648.75
L	11 992.56±1 447.10	57 434.44±3 852.98
M	12 965.67±1 235.94	66 660.56±13 177.13
H	13 092.56±1 102.84	64 972.44±12 929.04
A	0.79	0.37
F B	0.42	0.32
A×B	44.87**	1235.78 **

注 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) 下同。A 表示不同计划湿润层，B 表示不同土壤含水率控制下限。

不同处理间千粒质量表现为 L 处理>M 处理=H 处理，T60 处理>T80 处理>T100 处理，L 处理和 M 处理较 H 处理其千粒质量分别增大了 1.5%、0.1%，T80 处理和 T100 处理较 T60 处理千粒质量分别减小了 2.3%、2.6%。T60L 处理和 T60M 处理的千粒质量最大。故土壤含水率控制下限越高，千粒质量呈增大的趋势，60 cm 的低计划湿润层深度较 80 cm 和 100 cm 更有利于千粒质量的增加。

不同水分处理间产量表现为 H 处理>L 处理>M 处理，T80 处理>T60 处理=T100 处理，L 处理和 M 处理产量较 H 处理分别减少了 12.7%、4.6%，T60 处理和 T80 处理产量较 T100 处理分别增大了 1.3%、6.0%。T80H 处理产量最大，T100L 处理产量最小，最大值和最小值之间相差 16.1%。土壤含水率控制下限越高，产量呈增加趋势；当计划湿润层深度为 80 cm 时产量相对最高。而不同水分处理间耗水量表现为 H 处理>M 处理>L 处理，T80 处理>T100 处理>T60 处理。其中 T100H 处理耗水量最大，比耗水量最小的

T60L 处理耗水量增加 13.9%。

表 4 不同水分处理下冬小麦产量构成、耗水量及水分利用效率

Table 4 Yield composition, water consumption and water use efficiency of winter wheat under different treatments

计划湿润层深度		土壤含水率控制下限			平均值
		L 处理	M 处理	H 处理	
穗数/(10^4 hm^{-2})	T60	16.60 $\pm$ 0.1a	16.57 $\pm$ 0.1a	16.73 $\pm$ 0.2a	16.63 $\pm$ 0.1a
	T80	16.73 $\pm$ 0.4a	16.73 $\pm$ 0.1a	16.73 $\pm$ 0.2a	16.67 $\pm$ 0.0a
	T100	16.80 $\pm$ 0.1a	16.73 $\pm$ 0.2a	16.67 $\pm$ 0.2a	16.73 $\pm$ 0.1a
	平均值	16.71 $\pm$ 0.1a	16.68 $\pm$ 0.1a	16.71 $\pm$ 0.2a	-
穗粒数	T60	42.57 $\pm$ 0.2e	44.47 $\pm$ 0.3c	44.70 $\pm$ 0.3c	43.91 $\pm$ 0.9c
	T80	43.33 $\pm$ 0.3d	45.27 $\pm$ 0.3b	45.50 $\pm$ 0.3ab	44.70 $\pm$ 0.9a
	T100	42.40 $\pm$ 0.1e	44.47 $\pm$ 0.3c	45.70 $\pm$ 0.1a	44.19 $\pm$ 1.4b
	平均值	42.77 $\pm$ 0.4c	44.74 $\pm$ 0.4b	45.30 $\pm$ 0.4a	-
千粒质量/g	T60	47.77 $\pm$ 0.2a	47.43 $\pm$ 0.2a	46.37 $\pm$ 0.3bc	47.19 $\pm$ 0.6a
	T80	46.43 $\pm$ 0.1b	45.73 $\pm$ 0.2d	46.17 $\pm$ 0.2bc	46.11 $\pm$ 0.3b
	T100	46.37 $\pm$ 0.4bc	45.57 $\pm$ 0.2d	46.00 $\pm$ 0.1cd	45.98 $\pm$ 0.3b
	平均值	46.85 $\pm$ 0.6a	46.24 $\pm$ 0.8b	46.18 $\pm$ 0.2b	-
产量/(kg hm^{-2})	T60	7184.96 $\pm$ 64e	7781.58 $\pm$ 91c	7931.08 $\pm$ 58bc	7632.54 $\pm$ 322b
	T80	7452.88 $\pm$ 83d	8123.68 $\pm$ 94b	8369.71 $\pm$ 162a	7982.09 $\pm$ 387a
	T100	7025.47 $\pm$ 73f	7450.94 $\pm$ 167d	8119.85 $\pm$ 142b	7532.09 $\pm$ 450bc
	平均值	7221.17 $\pm$ 176c	7785.46 $\pm$ 275b	8140.21 $\pm$ 179a	-
耗水量/mm	T60	383.56 $\pm$ 1.6e	397.63 $\pm$ 1.3d	397.37 $\pm$ 0.7d	392.85 $\pm$ 6.6c
	T80	424.34 $\pm$ 2.1c	457.23 $\pm$ 1.9a	450.99 $\pm$ 3.2ab	444.19 $\pm$ 14.3a
	T100	445.43 $\pm$ 2.5b	420.43 $\pm$ 0.6c	456.61 $\pm$ 1.2a	440.82 $\pm$ 15.1b
	平均值	417.78 $\pm$ 25.6c	425.10 $\pm$ 24.6b	434.99 $\pm$ 26.7a	-
WUE/ ($\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)	T60	18.75 $\pm$ 0.6d	19.57 $\pm$ 0.5b	19.96 $\pm$ 1.1a	19.43 $\pm$ 0.5a
	T80	17.56 $\pm$ 0.3ef	17.77 $\pm$ 0.9e	19.15 $\pm$ 0.3c	18.16 $\pm$ 0.7b
	T100	15.77 $\pm$ 1.2h	16.74 $\pm$ 0.4g	17.31 $\pm$ 0.7f	16.61 $\pm$ 0.6c
	平均值	17.36 $\pm$ 1.2b	18.03 $\pm$ 1.2a	18.81 $\pm$ 1.1a	-

最终, 水分利用效率表现为 H 处理=M 处理>L 处理, T60 处理>T80 处理>T100 处理, T60H 处理的水分利用效率达到最大, 为 19.96 kg/($\text{hm}^2 \text{ mm}$)。由此可见, 计划湿润层深度越低 (60~100 cm), 土壤含水率控制下限越高 (40%~60%), 冬小麦水分利用效率呈增高的趋势。

3 讨论

在本研究中, 较小的计划湿润层深度和较高的土壤含水率控制下限缩短了灌水间隔, 减少了灌水定额, 当计划湿润层深度较小时, 土壤水主要分布在表层, 易于被蒸腾作用所消耗, 因此表层及浅层土壤水能及时获得补充^[21-22], 而灌水频率越高, 土壤含水率变异性也越高^[23-24], 在这 2 个因子的共同作用下, 土层水分交换频繁。相关研究表明, 增加灌水频率将增加土壤表层水分湿润时间, 增大土壤蒸发损失。但当叶面积指数大于一定数值时, 土壤蒸发占蒸散比例显著降

低。因此, 对于冬小麦限水灌溉下增加灌水频率的时间应在作物生长的中后期^[19]。在本研究中, 整个生育期测墒补灌后不同处理之间的灌水差异也多集中在播种 150 d 之后。

试验中各处理的灌水量同时受到土壤含水率控制下限与计划湿润层深度的影响。例如, T80H 和 T100L 处理总灌水量最大均为 240 mm, 但在试验中二处理的灌水情况又有所差异, T80H 处理的初次灌水时间为播种后第 156 d, 而 T100L 处理的初次灌水时间为播种后 190 d, T100L 处理的计划湿润层深度最大, 土壤含水率控制下限最低, 首次达到对应的灌溉控制下限所需的时间也较长, 可以通过该 2 个灌溉控制指标来控制初次灌水时间。且冬小麦在返青后初次灌水时间的早晚会对植株后期的生长发育造成较大影响^[22-23], 李晓爽等^[10]发现在冬小麦拔节后 10~15 d 灌水, 既能够充分利用土壤蓄水, 也有利于提高产量和水分利用效率, 刘志良等^[22]发现在春灌一水条

件下,适当推迟灌拔节水有利于小麦产量的提高,其中4月5日灌水效果最好。在本研究中对T80H处理的初次补灌时间,而最终T80H处理的产量比T100L处理大16.1%,这与前人研究结果^[10,22-24]一致。

巨龙等^[24]研究表明,随着灌水量的增加,边际土壤含水率先增大后减小,水分利用效率呈递减趋势。在本试验中,过度地提高计划湿润层深度或者将土壤含水率控制下限设置过低均不利于冬小麦叶片的生长发育,这可能是因为计划湿润层深度较深或土壤含水率控制下限过低会导致冬小麦根系附近的土壤较长时间处于含水量较低的状态,水分过多集中到了深层土壤^[25-26]。本研究中花前花后的干物质累积量与灌溉定额整体上呈正相关关系,傅晓艺等^[27]发现灌溉次数越多,灌水总量越大,冬小麦生物产量越高,这与本研究结果一致。

本试验表明,计划湿润层深度越浅(60~100 cm)、土壤含水率控制下限越高(40%~60%)的处理使得水分利用效率相对最大,这可能是由于在这种灌溉策略下,灌水时间与冬小麦需水规律相契合,且水分主要集中在冬小麦主要根系分布区,深层渗漏量较少,更易于被冬小麦吸收利用^[28-29]。另外,当主要根系分布层土壤水分达到阈值时,能及时获得补充,避免了因水分亏缺而导致的减产^[30-31]。因此,在本试验条件下,计划湿润层深度越浅、土壤含水率控制下限越高,其水分利用效率越高。

4 结 论

1) 计划湿润层深度(60~100 cm)过高或土壤含水率控制下限(40%~60%)过低,均会抑制LAI的增长。随计划湿润层深度(60~100 cm)和土壤含水率控制下限(40%~60%)的增大,冬小麦花前及花后的干物质累积量呈先增大后减小的趋势。

2) 土壤含水率控制下限(40%~60%)越高,产量及耗水量均呈现增加趋势;当计划湿润层深度为80 cm时产量最高,耗水量也最高;而计划湿润层深度(60~100 cm)越低,土壤含水率控制下限(40%~60%)越高,冬小麦水分利用效率呈现增高的趋势。

3) 在本试验条件下,计划湿润层深度为60 cm、土壤含水率控制下限为土壤有效含水率的60%时,节水稳产效果相对最优。

参考文献:

- [1] BAI Bing, CHENG Yanpei, JIANG Zhongcheng, et al. Climate change and groundwater resources in China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2017, 5(1): 44-52.
- [2] ZHANG A L, GAO R Z, WANG X X, et al. Historical trends in air temperature, precipitation, and runoff of a plateau inland river watershed in North China[J]. Water, 2019, 12(1): 74.
- [3] 赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 等. 气候变化对我国主要粮食作物产量的

影响及适应措施[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 317-326.

- ZHAO Yanxi, XIAO Dengpan, TANG Jianzhao, et al. Effects of climate change on the yield of major graincrops and its adaptation measures in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 317-326.
- [4] LI J S, FEI L J, LI S, et al. Development of "water-suitable" agriculture based on a statistical analysis of factors affecting irrigation water demand[J]. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140986.
- [5] 钱永兰, 毛留喜, 周广胜. 全球主要粮食作物产量变化及其气象灾害风险评估[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 226-235.
- QIAN Yonglan, MAO Liuxi, ZHOU Guangsheng. Changes in global main crop yields and its meteorological risk assessment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 226-235.
- [6] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 等. 协同提升黄淮海平原作物生产与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6): 1 149-1 157.
- MEI Xurong, KANG Shaozhong, YU Qiang, et al. Pathways to synchronously improving cropproductivity and field water use efficiency in the North China plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1 149-1 157.
- [7] XU X X, ZHANG M, LI J P, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 219-227.
- [8] 李翠平, 秦保平, 李亚静, 等. 减少灌水量对强筋小麦花后干物质和氮素积累、转运及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 964-971.
- LI Cuiping, QIN Baoping, LI Yajing, et al. Effect of reducing irrigation amount on the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen and grain yield after flowering of strong gluten wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(8): 964-971.
- [9] ZHENG J Q, WANG J, REN W, et al. Modeling the impacts of climate, soil, and cultivar on optimal irrigation amount of winter wheat in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(2): 1176-1189.
- [10] 李晓爽, 党红凯, 宋妮, 等. 分期定量春灌一水对麦田蒸散量与产量构成的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 280-289.
- LI Xiaoshuang, DANG Hongkai, SONG Ni, et al. Effects of irrigation once at different time on waterconsumption and dry matter production of winter wheat in spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 280-289.
- [11] 周始威, 胡笑涛, 王文娥, 等. 基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 121-129.
- ZHOU Shiwei, HU Xiaotao, WANG Wen'e, et al. Optimization of irrigation schedule based on RZWQM model for spring wheat in Shiyang River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 121-129.
- [12] 李晓航, 蒋志凯. 测墒补灌对新麦 26 产量、品质及耗水特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 94-100.
- LI Xiaohang, JIANG Zhikai. Effects of soil moisture monitoring based supplemental irrigation on the yield, quality and water consumption characteristics of Xinmai 26[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 94-100.
- [13] 金修宽, 马茂亭, 赵同科, 等. 测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、

- 氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(7): 1 334-1 344.
- JIN Xiukuan, MA Maoting, ZHAO Tongke, et al. Effects of nitrogen application on yield, water and nitrogen use efficiency of winter wheat under supplemental irrigation based on measured soil moisture content[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(7): 1 334-1 344.
- [14] 张瑞, 于振文, 张永丽, 等. 越冬期测墒补灌对小麦耗水特性和光合有效辐射截获利用的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 877-884.
- ZHANG Rui, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al. Effects of supplemental irrigation by measuring soil moisture on water consumption characteristics and radiation utilization in wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 877-884.
- [15] HAGHVERDI A, LEIB B G, WASHINGTON-ALLEN R A, et al. High-resolution prediction of soil available water content within the crop root zone[J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 167-179.
- [16] 白致威, 段兴武, 丁剑宏, 等. 土壤有效含水量的经验估算模型: 以黑土为例[J]. 中国农学通报, 2015, 31(20): 153-159.
- BAI Zhiwei, DUAN Xingwu, DING Jianhong, et al. An experience estimation model of soil available water-holding capacity: A case study of black soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(20): 153-159.
- [17] 张俊鹏, 刘祖贵, 孙景生, 等. 不同水分和覆盖处理对冬小麦生长及水分利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 7-11.
- ZHANG Junpeng, LIU Zugui, SUN Jingsheng, et al. Effects of different moisture and mulching treatments on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(8): 7-11.
- [18] 汪顺生, 刘东鑫, 孟鹏涛, 等. 不同种植模式冬小麦产量与耗水量的模糊综合评判[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 161-166.
- WANG Shunsheng, LIU Dongxin, MENG Pengtao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on yield and water consumption of winter wheat with different cropping patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 161-166.
- [19] CONSTANTIN J, PICHENY V, NASSAR L H, et al. A method to assess the impact of soil available water capacity uncertainty on crop models with a tipping-bucket approach[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 369-381.
- [20] 李久生. 灌水均匀度与深层渗漏量关系的研究[J]. 农田水利与小水电, 1993(1): 1-4.
- LI Jiusheng. Study on the relationship of water application uniformity and deep percolation[J]. China Rural Water and Hydropower, 1993(1): 1-4.
- [21] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2 593-2 603.
- LYU Guangde, WANG Chao, JIN Xuemei, et al. Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2 593-2 603.
- [22] 刘志良, 曹彩云, 潘胤霖, 等. 不同时间春灌一水对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2020, 24(2): 35-39.
- LIU Zhiliang, CAO Caiyun, PAN Yinlin, et al. Effects of irrigation once in spring at different dates on growth and yield of winter wheat[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2020, 24(2): 35-39.
- [23] 张光岩, 李俊良, 徐良菊, 等. 不同灌溉模式对小麦干物质积累及产量经济效益的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 31-38.
- ZHANG Guangyan, LI Junliang, XU Liangju, et al. Effects of different irrigation modes on dry matter accumulation and yield economic benefit of wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 31-38.
- [24] 巨龙, 王全九, 王琳芳, 等. 灌水量对半干旱区土壤盐分分布特征及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 86-90.
- JU Long, WANG Quanjiu, WANG Linfang, et al. Effects of irrigation amounts on yield of winter wheat and distribution characteristics of soil water-salt in semi-arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(1): 86-90.
- [25] 亢秀丽, 靖华, 马爱平, 等. 黄淮海北片麦田微喷灌水量对土壤贮水耗水及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 221-226.
- KANG Xiuli, JING Hua, MA Aiping, et al. Effects of micro sprinkler irrigation amounts on soil water storage and consumption and water use efficiency in the north of Huang-Huai-Hai wheat field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(1): 221-226.
- [26] 和刚, 路振广, 邱新强, 等. 不同水分调亏下冬小麦适宜灌水定额研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(9): 65-69.
- HE Gang, LU Zhenguang, QIU Xinqiang, et al. Suitable irrigation water quotas of winter wheat under water deficit irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(9): 65-69.
- [27] 傅晓艺, 王红光, 刘志连, 等. 不同水分处理对小麦氮素和干物质积累与分配的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 955-963.
- FU Xiaoyi, WANG Hongguang, LIU Zhilian, et al. Effect of different water treatments on nitrogen and dry matter accumulation and distribution in wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(8): 955-963.
- [28] SHANG Y Q, LIN X, LI P, et al. Effects of supplemental irrigation at the jointing stage on population dynamics, grain yield, and water-use efficiency of two different spike-type wheat cultivars[J]. Plos One, 2020, 15(4): e0230484.
- [29] 邵光成, 王志宇, 王小军, 等. 基于 DSSAT 模型的冬小麦最优灌溉制度研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 289-297.
- SHAO Guangcheng, WANG Zhiyu, WANG Xiaojun, et al. Optimal irrigation schedule based on DSSAT model for winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 289-297.
- [30] 梁硕硕, 关劼兮, 李璐, 等. 水分处理对冬小麦生育期耗水分配及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 52-59.
- LIANG Shuoshuo, GUAN Jiexi, LI Lu, et al. Impact of irrigation schedules on yield, water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 52-59.
- [31] 王慧军, 张喜英. 华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效益探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(5): 724-733.
- WANG Huijun, ZHANG Xiying. Evaluating the comprehensive effects of planting winter wheat in the groundwater depletion regions in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(5): 724-733.

The Effects of Criteria Used in Irrigation Control on Growth and Water Consumption of Winter Wheat

LEI Yuan^{1,2}, LIU Zhandong^{1*}, ZHANG Weiqiang³, HUANG Chao^{1,2}, DUAN Aiwang^{1*}, LOU He⁴, LIU Zugui¹

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Henan Institute of Science and Technology for Development, Zhengzhou 450003, China; 4. Henan Weisheng Electric Appliance Co. LTD, Xinxiang 450001, China)

Abstract: **【Background】** Improving crop yield while in the meantime saving water use in irrigation is the double whammy to alleviate the conflict between dwindling water resources and sustaining agricultural production in northern China. How to improve irrigation water use efficiency by optimizing irrigation control criteria has been intensively studied, but most of them took the low limit of soil water content in a fixed wetting zone as the irrigation criterion, overlooking that root zone elongates as plant grows. **【Objective】** The purpose of this paper is to address this equation. We investigated how wetting depth and soil moisture in it can be used as a combined criterion to manage winter wheat irrigation, aimed to provide an improved method for agriculture water management and automatic irrigation of winter wheat in northern China. **【Method】** The experiment was conducted at a winter wheat field by controlling soil water content at 40% (L), 50% (M) and 60% (H) of the field capacity, within the soil layer in the depth of 60 cm, 80 cm and 100 cm respectively. Therefore, there were nine treatments which were randomly arranged in the field. During the experiment, we measured water consumption of the winter wheat and change in its biomass in each treatment. **【Result】** Different combinations of wetting depth and critical water content led to a change in both irrigation amount and irrigation frequency. Increasing the wetting depth or reducing the critical soil moisture hindered crop growth and development. When the wetting depth was set between 60 cm and 100 cm and the critical water content was in 40%~60% of the field capacity, dry matter accumulation before and after the flowering stage increased first followed by a decline, as time elapsed. Increasing the critical soil water content led to an increase in yield and water consumption. Water consumption was the highest when the wetting depth was 80 cm, and the least when the wetting depth was 60 cm. The maximum water use efficiency was 19.96 kg/(hm² mm), achieved when critical soil moisture in soil depth of 60 cm was 60% of the field capacity, which was 21.0% up compared to the least when the critical water content in the 0~100 cm of soil was 40% of the field capacity. **【Conclusion】** Keeping the soil moisture in 0~60 cm of soil not dropping below 60% of the field capacity is most efficient and optimal for improving irrigation water use efficiency of winter wheat in northern China.

Key words: winter wheat; dry matter; planned wetting depth; lower limit of soil water content control; yield

责任编辑：陆红飞