

张雅冰, 程伍群, 吴现兵, 等. 地下膜调控润灌对冬小麦耗水规律及水分利用效率的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 399-406. ZHANG Y B, CHENG W Q, WU X B, et al. Effects of subsurface membrane regulated moist irrigation on water consumption pattern and water use efficiency of winter wheat[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 399-406. (in Chinese)

地下膜调控润灌对冬小麦耗水规律 及水分利用效率的影响

张雅冰¹, 程伍群¹, 吴现兵¹, 陶冶¹, 侯振军², 陈丽², 赵一凡¹

(1. 河北农业大学城乡建设学院, 河北 保定 071000; 2. 保定市灌溉试验站, 河北 保定 071000)

摘要:通过测坑及田间试验, 探究地下膜调控润灌条件下冬小麦各生育期的耗水量、耗水强度及模系数, 研究不同供水条件对作物产量和水分利用效率的影响, 提出该灌水技术条件下所研究作物的适宜灌水定额和灌溉制度。研究表明: 在试验设定的灌水量范围内, 较小的灌水定额可获得较高的水分利用效率; 综合考虑产量和水分利用效率, 地下膜调控润灌条件下冬小麦较优的灌水处理为 S_M 处理, 即灌水定额为 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌水时期分别是返青、拔节、抽穗、灌浆 4 个时期, 灌水次数为 4 次, 灌溉定额为 $1\ 800 \text{ m}^3/\text{hm}^2$; 在 S_M 处理下, 冬小麦产量可达到 $9\ 520.03 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 水分利用效率可达到 $2.85 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。该试验结果可为缺水地区冬小麦种植探究高效可行的灌溉方式提供合理的参考依据。

关键词:膜调控润灌; 冬小麦; 耗水规律; 产量; 灌水定额

中图分类号: S275.9 文献标志码: A DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0040

华北平原冬小麦生长季降水量较少, 灌溉方式较为粗放, 水资源的利用效率较低^[1]。大力发展节水灌溉或节水农业是缓解我国水资源匮乏的有效途径, 也是转变农业增长方式, 使传统农业向优质、高效农业转变的重要举措^[2-3]。地下膜调控润灌作为一种高效节水灌溉技术^[4], 已经逐渐应用于生产实践中^[5-6]。地下膜调控润灌技术的原理是利用土壤水的水吸力, 使水分和肥料停留并均匀分布在作物主要根系层^[7]。这将有利于根系充分吸收利用水资源, 从而减少无效水分和肥料的损失, 达到节水节肥的效果^[8], 对解决华北平原农业水资源紧缺问题起到重要的推动作用^[9-10]。

滴灌是迄今为止农田灌溉最节水的灌溉技术之一, 滴灌技术的发展呈现出多元化趋势^[11]。近年来, 许多学者对此进行了深入研究: 要家威等^[12]对滴灌技术条件下多种关键技术参数进行研究优化; 王显超等^[13]提出在农田灌溉过程中将毛管埋入地下, 借助毛管的灌水器, 将水缓慢而均匀渗入土壤中, 形成地下滴灌技术; 牛靖冉等^[14]指出膜下滴灌技术是

将滴灌与覆膜技术相结合, 使其不仅具有滴灌技术节水的点而且达到了抑制棵间蒸发、增温保墒的效果; 仵峰等^[15]最早认识到高效灌溉方式是按照作物所要求的最适宜水分环境连续对作物进行灌水, 灌水频率达到与作物需水同步的无间隔灌水^[16]。抽穗—灌浆和灌浆—成熟阶段是冬小麦耗水的关键期, 若灌水定额过小会导致冬小麦生长受到严重的水分胁迫, 进而阻碍根系对土壤水分的吸收利用, 影响植株正常生长^[17]。地下膜调控润灌技术节水增产的原理是满足作物良好生长对土壤水分的要求, 在灌溉时减少地表蒸发和深层渗漏, 同时在调控膜的作用下使作物的根区处于最适宜的土壤含水量区间内, 按照作物需水规律, 在作物耗水关键期及时适量补充水分消耗, 使作物在获得优质高产的同时提高水分利用效率^[18]。本文通过测坑试验与田间试验探究地下膜调控润灌下冬小麦的耗水规律, 研究不同供水条件对作物产量和水分利用效率的影响, 明确地下膜润灌小麦的优势特点, 为探索华北平原小麦种植高效可行的灌溉方式提供合理的参

收稿日期: 2021-11-30 修回日期: 2021-11-30 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1036.003.html>

基金项目: 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金项目(sklhse-2020-A-01)

作者简介: 张雅冰(1998—), 女, 河北邢台人, 主要从事农业水资源可持续利用理论与技术研究。E-mail: 963549903@qq.com

通信作者: 程伍群(1965—), 男, 河北文安人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: chengwuqun@126.com

考依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验于 2021—2022 年在河北保定市望都县灌溉试验站(38°42'9"N, 115°6'57"E, 海拔高程 51.0 m)进行, 该区多年平均气温 11.8 ℃, 无霜期 189 d, 年平均日照时数 2 677.8 h, 多年平均降雨量约为 508.9 mm, 多年平均蒸发量 1 709.56 mm。冬小麦供试品种为

“石新 828”, 2021 年 10 月 22 日播种, 2022 年 6 月 12 日收获, 全生育期降雨量共计 111.1 mm。生育期气温和降雨量分布见图 1。该区域土壤为通体轻壤质潮褐土, 1 m 土层的平均田间持水量为 21%, 密度为 1.58 g/cm³, 土壤有机质 0.7%, 全氮 0.05%, 速效磷 13.67 mg/kg, 有效钾 77.6 mg/kg, 矿化度 0.21 g/L。地下水埋藏较深, 其向上补给量可忽略不计^[19]。

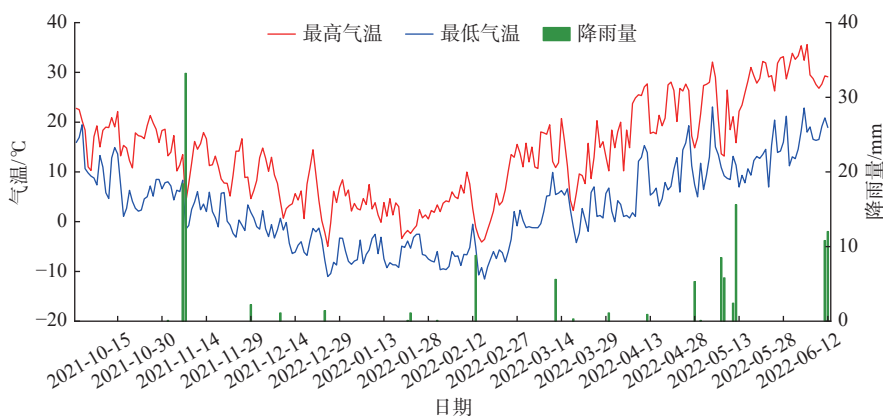


图 1 2021—2022 年冬小麦生育期气温和降雨量分布

Fig. 1 Temperature and rainfall distribution in winter wheat fertility from 2021 to 2022

1.2 试验设计

冬小麦采用 15 cm 等行距播种, 播种深度 5 cm, 播种量为 300 kg/hm²。底肥选用西洋控释复合肥(N-P₂O₅-K₂O: 含量 20%-15%-5%), 施加量为 750 kg/hm², 于冬小麦拔节期追加尿素 1 次随灌水追施, 追肥量为 300 kg/hm²^[18]。试验田所有试验灌水施肥方式均为地下膜调控润灌, 每个小区进水口处均安装水表控制灌水量, 滴灌管理深为 35 cm, 间距 80 cm, 调控膜上、下层为正方形不透水聚乙烯薄膜, 膜规格为 25 cm×40 cm(上膜边长×下膜边长), 中间为透水基质层过滤棉与上膜尺寸一致。滴头设计流量 2.0 L/h, 间距 80 cm, 滴灌管放置于地下 35 cm 土层后, 将上、下膜分别放置在滴头上、下位置处, 且上、下膜的对称中心与滴头重合。

本试验设计是在总结保定灌溉试验站前期测坑试验数据基础上, 分析在地表管灌条件下冬小麦的最优灌溉制度, 并以此为参考设计在地下膜调控润灌条件下的灌溉试验方案。试验分为测坑试验和田间试验。

测坑试验。使用 2.00 m×3.33 m 测坑 9 个, 试验因素为灌水总量控制, 设置 3 个灌水总量水平处理: 4 500 m³/hm²(T₁)、4 200 m³/hm²(T₂)、3 900 m³/hm²(T₃), 采用正交试验设计, 共 3 个处理, 每个处理 3 次重复,

共 9 个小区, 随机布置于 9 个测坑内。通过分析试验站前期测坑试验数据可知, 冬小麦需水量较大的生育期为拔节期和抽穗期, 该试验在拔节期和抽穗期设置 3 个灌水定额水平处理: 525、450、375 m³/hm²。运用地下膜调控润灌技术对冬小麦进行适度灌溉, 灌浆期为小麦高产的关键期, 加大灌溉水量延缓根系和功能叶片的衰老, 增强光合产物的积累和运转提高千粒重保证产量。具体测坑试验设计方案及各处理不同生育期灌水量见表 1。

田间试验。试验田东西宽 44.2 m, 南北长 64.0 m, 占地规模约为 0.28 hm², 试验处理以各生育阶段不同灌水下限为主, 追肥次数均为一次追肥, 在拔节期追加尿素 300 kg/hm², 当土壤含水率达到设定的灌水下限时进行灌水, 灌水下限设置 2 个水平, 分别为田间持水量的 55% 和 65%, 均采用地下膜调控润灌, 灌水量设置 3 个水平, 设置 3 个灌水定额水平处理: 540 m³/hm²(H)、450 m³/hm²(M)、360 m³/hm²(L), 采用正交试验设计, 共 6 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 18 个小区, 每小区长 30 m、宽 5 m, 小区面积 150 m², 按顺序布置于 0.28 hm² 大田内。具体田间试验设计方案见表 2, 各处理不同生育期灌水量见表 3。

表1 测坑试验设计及各处理不同生育期灌水量

Tab. 1 Pit test design and irrigation water availability at different fertility stages for each treatment

单位: m³/hm²

处理	各生育期灌溉日期								总灌水量
	苗期 10月23日	返青期 4月7日	拔节期 4月19日	拔节期 4月28日	抽穗期 5月4日	抽穗期 5月10日	灌浆期 5月19日	灌浆期 5月28日	
T ₁	450	450	525	525	525	525	750	750	4 500
T ₂	450	450	450	450	450	450	750	750	4 200
T ₃	450	450	375	375	375	375	750	750	3 900

表2 田间试验设计方案

Tab. 2 Field trial design scheme

处理	灌水下限/%	次灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)
N _H	65	540
N _M	65	450
N _L	65	360
S _H	55	540
S _M	55	450
S _L	55	360

注:①灌水下限以试验地田间持水量的百分比计,%。②N、S分别表示灌水下限是田间持水量的65%和55%;H、M和L分别表示次灌水量540、450和360 m³/hm²。

表3 田间试验各处理不同生育期灌水量

Tab. 3 Field trials of irrigation water at different fertility stages for each treatment

单位: m³/hm²

处理	各生育期灌溉日期						总灌水量
	返青期	返青期	拔节期	抽穗期	抽穗期	灌浆期	
	3月14日	4月1日	4月15日	5月1日	5月4日	5月27日	
N _H	540	540	540	540	0	540	2 700
N _M	450	450	450	450	0	450	2 250
N _L	360	360	360	360	0	360	1 800
S _H	0	540	540	0	540	540	2 160
S _M	0	450	450	0	450	450	1 800
S _L	0	360	360	0	360	360	1 440

注: N、S分别表示灌水下限是田间持水量的65%和55%; H、M和L分别表示次灌水量540、450和360 m³/hm²。

1.3 测定项目与指标

1.3.1 土壤指标测定

试验田灌水时间和灌水定额由北京力高泰科技有限公司生产的 METER ZL6 型土壤水分物联网监测系统所测得的土壤含水率确定,该传感器铺设探头后可在土壤深度为 15、35 和 45 cm 处实时检测试验田土壤含水率情况。田间持水量和饱和含水率均采用环刀浸泡法测定,在小麦播种前用环刀水平开挖垂直取原状土,按照 2015 版《土壤田间持水量测定技术规程》测定其密度及田间持水量^[20]。

测坑试验:分别在测坑的膜中心剖面、下膜边缘剖面 and 相邻毛管出水点连线的垂直平分线上布置土壤水分监测探头,探头埋深 15、35 和 45 cm,连续监测土壤水分的变化情况,尤其是灌水前后土壤水分的实时变化情况。

田间试验:试验区灌水前后采用烘干法测定土壤含水率,各处理每 7~10 d 测定 1 次,以确定灌水时间。使用土钻取样,测定深度每 10 cm 为 1 层取至 100 cm 处,共分为 10 层。取样后,称量鲜土样的质量 m_1 ,并将其放入恒温 105 ℃ 的烘箱,烘干至恒重,测量烘干后的土壤质量 m_2 ,计算试验区土壤含水率 θ_g ^[21],其公式为

$$\theta_g = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为铝盒质量, g; m_1 为烘干前土样和铝盒的质量, g; m_2 为烘干后土样和铝盒的质量, g。

1.3.2 作物耗水量

有效降雨量的计算数据来自气象站的监测数据。作物耗水量依据水量平衡法计算^[22],计算公式为

$$ET = P + I + G + \Delta W \quad (2)$$

式中: ET 为作物生育期某时段的耗水量, mm; P 为时段内有效降水量, mm; I 为时段内灌水量, mm; G 为时段内地下水补给量, mm, 由于地下水埋藏较深向上补给可忽略不计, $G = 0$; ΔW 为时段内土壤储水量的变化量, mm。

1.3.3 考种与测产

在冬小麦收获时期,随机在试验田各处理小区选取 3 处冬小麦样本,并在每处随机选取 10 株进行室内考种,测量其株高、穗长、穗粒数、千粒重等指标,计算理论产量^[23]。同时每个小区随机取 5 处 1 m² 的冬小麦取样脱粒后计算其理论产量。

1.3.4 水分利用效率

冬小麦水分利用效率计算公式为

$$E_{WU} = Y/ET \quad (3)$$

式中: E_{WU} 为水分利用效率, kg/m³; Y 为冬小麦收获时的籽粒产量, kg/hm²。

2 结果与分析

2.1 田间试验冬小麦不同生育期耗水规律

在冬小麦生育期,有效降雨量为 111.1 mm。利用田间实测土壤水分数据,计算冬小麦各生育期的阶段耗水量、阶段日耗水量及模系数^[6]。通过对比可看出冬小麦在越冬—返青阶段各处理耗水量和模系数均最小,不同处理间该阶段耗水量在 41.38~54.73 mm,模系数在 13.01%~14.41%,耗水量大小为 N_H 处理 $>N_M$ 处理 $>N_L$ 处理 $>S_H$ 处理 $>S_M$ 处理 $>S_L$ 处理。冬小麦灌浆—成熟阶段各处理耗水量和模系数值均最大,不同处理间该阶段耗水量变化范围为 86.94~106.77 mm,模系数变化范围为 24.62%~29.99%,其中: N_M 处理在该阶段耗水量最大,阶段耗

水量值为 106.77 mm; S_M 处理该阶段模系数最大,阶段模系数值为 29.99%。

试验表明:冬小麦越冬—返青阶段日耗水量最小,该阶段日耗水量最小值为 0.36 mm;在灌浆—成熟阶段日耗水量最大,该阶段日耗水量最大值为 4.64 mm;抽穗—灌浆阶段日耗水量次之,该阶段日耗水量最大值为 3.85 mm。田间试验耗水量见表 4。在灌浆—成熟阶段,日耗水量大小为 N_M 处理 $>N_H$ 处理 $>S_M$ 处理 $>S_H$ 处理 $>N_L$ 处理 $>S_L$ 处理。抽穗—灌浆和灌浆—成熟阶段是冬小麦耗水的关键期,试验中 S_L 处理灌水定额最小其日耗水量也最小,当灌水定额过小时将会导致冬小麦生长受到严重的水分胁迫,进而阻碍根系对土壤水分的吸收利用,影响植株正常生长。

表 4 田间试验耗水量
Tab. 4 Water consumption table for field trials

处理	指标	播种—越冬	越冬—返青	返青—拔节	拔节—抽穗	抽穗—灌浆	灌浆—成熟	全生育期
		10月22日— 11月20日	11月21日— 3月14日	3月15日— 4月14日	4月15日— 5月9日	5月10日— 5月25日	5月26日— 6月17日	
		30 d	114 d	30 d	25 d	16 d	23 d	238 d
N_H	阶段耗水量/mm	76.19	54.73	136.68	86.72	52.85	101.17	410.94
	阶段日耗水量/mm	2.54	0.48	4.56	3.47	3.30	4.40	3.31
	模系数/%	18.54	13.32	33.26	21.10	12.86	24.62	100
N_M	阶段耗水量/mm	76.66	49.86	100.78	55.85	55.99	106.77	373.21
	阶段日耗水量/mm	2.56	0.44	3.36	2.23	3.50	4.64	3.01
	模系数/%	20.54	13.36	27.00	14.96	15.00	28.61	100
N_L	阶段耗水量/mm	76.51	51.43	93.45	46.96	61.65	90.70	356.99
	阶段日耗水量/mm	2.55	0.45	3.12	1.88	3.85	3.94	2.88
	模系数/%	21.43	14.41	26.18	13.15	17.27	25.41	100
S_H	阶段耗水量/mm	74.47	51.27	89.27	85.47	55.68	95.83	370.28
	阶段日耗水量/mm	2.48	0.45	2.98	3.42	3.48	4.17	2.99
	模系数/%	20.11	13.85	24.11	23.08	15.04	25.88	100
S_M	阶段耗水量/mm	84.04	43.42	64.57	57.73	47.67	100.12	333.86
	阶段日耗水量/mm	2.80	0.38	2.15	2.31	2.98	4.35	2.69
	模系数/%	25.17	13.01	19.34	17.29	14.28	29.99	100
S_L	阶段耗水量/mm	84.20	41.38	47.09	38.48	51.28	86.94	301.84
	阶段日耗水量/mm	2.81	0.36	1.57	1.54	3.21	3.78	2.43
	模系数/%	27.90	13.71	15.60	12.75	16.99	28.80	100

注: N、S 分别表示灌水下限是田间持水量的 65% 和 55%; H、M 和 L 分别表示次灌水量 540、450 和 360 m^3/hm^2 。

2.2 测坑试验冬小麦不同生育期耗水规律

在测坑试验中设置了防雨棚,可忽略降雨产生的影响。利用土壤水分传感器以及部分实测土壤水分,计算冬小麦各生育期的阶段耗水量、阶段日耗水量及模系数。在测坑试验中冬小麦在越冬—

返青阶段各处理耗水量和模系数均最小,该阶段不同处理间耗水量和模系数变化幅度较小,耗水量在 13~15 mm,模系数在 3.46%~4.67%。在灌浆—成熟阶段各处理耗水量和模系数值均最大,不同处理间该阶段耗水量变化范围在 99~110 mm,模系数变

化范围在 27.16%~30.82%。在灌浆—成熟阶段耗水强度最大,拔节—抽穗及抽穗—灌浆阶段次之,灌浆—成熟阶段日耗水强度最大值为 6.88 mm。在越冬—返青阶段耗水强度最小,该阶段日耗水量最

小值 0.12 mm。见表 5。T₁、T₂、T₃ 处理全生育期耗水量分别为 405、353.70、325 mm,试验结果表明冬小麦耗水量随灌水量的增大而增大。

表 5 测坑试验耗水量

Tab. 5 Water consumption table for field trials

处理	指标	播种—越冬	越冬—返青	返青—拔节	拔节—抽穗	抽穗—灌浆	灌浆—成熟	全生育期
		10月22日— 11月20日	11月21日— 3月14日	3月15日— 4月14日	4月15日— 5月9日	5月10日— 5月22日	5月23日— 6月7日	
		30	111	33	25	13	16	228
T ₁	阶段耗水量/mm	68.00	14.00	28.00	123.50	80.50	110.00	405.00
	阶段日耗水量/mm	2.27	0.13	0.85	4.94	6.19	6.88	3.46
	模系数/%	16.79	3.46	6.91	30.49	19.88	27.16	100
T ₂	阶段耗水量/mm	41.70	13.00	27.00	104.00	59.00	109.00	353.70
	阶段日耗水量/mm	1.39	0.12	0.82	4.16	4.54	6.81	3.02
	模系数/%	11.79	3.68	7.63	29.40	16.68	30.82	100
T ₃	阶段耗水量/mm	51.00	15.00	24.00	87.50	48.50	99.00	325.00
	阶段日耗水量/mm	1.70	0.13	0.73	3.50	3.73	6.19	2.78
	模系数/%	15.69	4.62	7.38	26.92	14.92	30.46	100

2.3 不同灌水处理田间试验冬小麦产量构成

在不同灌水处理下,试验田冬小麦产量是穗长、穗粒数、千粒重共同作用的结果^[24],其大体趋势表现为随灌水量的增加而增加,在一定程度上适当增加灌水量可以促进产量的提高,但是灌水量过大,则会降低水分利用效率,甚至造成减产^[25]。当灌水下限为田间持水率的 65% 时,高、中和低 3 个水量处理产量分别为 9 582.70、9 520.81 和 9 101.82 kg/hm²,产量随灌水量的增大而增加。当灌水下限设置为田间持水率的 55% 时,高、中和低 3 个水量处理产量分别为 9 423.70、9 520.03 和 7 841.93 kg/hm²,产量随灌水量的增大先增加后减小。N 处理的穗长及穗粒数均随灌水量的增大而增加,即 N_H 处理>N_M 处理>N_L 处理,S 处理穗长随灌水量的增大先增加后减小,即 S_M 处理>S_H 处理>S_L 处理,穗粒数随灌水量的增大而增加,但差异性均不大,表明灌水定额对穗长及穗粒数影响较小;不同灌水处理千粒重均随灌水量的增大先增加后减小,表明适宜的灌水定额可以促进干物质向籽粒中分配和转运,从而提高作物千粒重最终获得较高的产量。

田间试验的 6 个处理中产量较高的为 N_H 处理、N_M 处理和 S_M 处理。从表 6 可以看出:冬小麦整个生育期,N_H 处理耗水量最大,为 410.94 mm,N_H 处理水分利用效率最低,为 2.33 kg/m³;S_L 处理耗水量最

小,其值为 301.84 mm,S_M 处理水分利用效率最高,其值达到了 2.85 kg/m³。由此可见:在地下膜调控灌溉下作物产量随着灌水量的增加而增大,即 H 水分>M 水分>L 水分处理;冬小麦水分利用效率 S_H、S_M 和 S_L 处理普遍高于 N_H、N_M 和 N_L 处理,S_M 处理最高,N_M 处理次之。分析可得,适宜的灌水定额既可以获得高产,也可以高效节水,地下膜调控灌溉下冬小麦较优的灌水定额应为 450 m³/hm²,灌水时期分别是返青、拔节、抽穗、灌浆 4 个时期,灌水次数为 4 次,灌溉定额为 1 800 m³/hm²。

表 6 田间试验冬小麦产量及水分利用效率

Tab. 6 Winter wheat yield and water use efficiency in field trials

处理	穗长/ cm	穗粒数	千粒重/ g	耗水量/ mm	产量/ (kg·hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)
N _H	6.32	33	51.26	410.94	9 582.70a	2.33c
N _M	6.22	31	52.40	373.21	9 520.81a	2.55b
N _L	6.08	30	50.23	356.99	9 101.82a	2.55b
S _H	5.75	32	50.90	370.28	9 423.70a	2.54b
S _M	5.96	32	51.65	333.86	9 520.03a	2.85a
S _L	5.87	30	48.84	301.84	7 841.93b	2.60a

注:①每列数据后小写字母不相同表示显著性在 0.05 水平差异性显著;每列数据有任何相同小写字母表示显著性在 0.05 水平差异不显著。②N、S 分别表示灌水下限是田间持水量的 65% 和 55%;H、M 和 L 分别表示次灌水量 540、450 和 360 m³/hm²。

2.4 不同灌水处理测坑试验冬小麦产量构成

测坑试验因素为灌水总量控制,3 个灌水总量水平处理分别为 $4\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ (T_1)、 $4\ 200\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ (T_2)、 $3\ 900\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ (T_3),对测坑试验冬小麦产量进行分析, T_1 、 T_2 、 T_3 3 个水量处理产量分别为 $9\ 104.05$ 、 $8\ 090.14$ 、 $7\ 283.20\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。在一定灌水总量的范围内,各处理穗长及穗粒数差异性不大,千粒重随着灌水量的增大而增大,作物产量随着灌水量的增加而增大。 T_2 处理水分利用效率最高, T_1 次之,而 T_3 处理产量仅为 $7\ 283.20\ \text{kg}/\text{hm}^2$,经分析灌水定额过小将导致冬小麦生长受到严重的水分胁迫,进而影响植株正常生长甚至减产。不同灌水处理对膜调控润灌冬小麦水分利用效率的影响分析见表 7,可以看出在冬小麦整个生育期,耗水量大小 T_1 处理 > T_2 处理 > T_3 处理, T_3 处理水分利用效率最低,为 $2.24\ \text{kg}/\text{m}^3$, T_2 处理水分利用效率最高,其值为 $2.29\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。在试验设定的灌水量范围内,灌水量最多的 T_1 处理获得了最大的小麦产量,但 T_2 处理获得了最高的水分利用效率,由此可见,在一定灌水总量的范围内,较小的灌水量可获得较高的水分利用效率。

表 7 测坑试验冬小麦产量及水分利用效率

Tab. 7 Yield and water use efficiency of winter wheat in pit trials

处理	穗长/ cm	穗粒数	千粒重/ g	耗水量/ mm	产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	水分利用效率/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
T_1	6.57	39	47.18	405.0	$9\ 104.05a$	$2.25a$
T_2	6.10	37	45.58	353.7	$8\ 090.14b$	$2.29a$
T_3	6.07	36	45.33	325.0	$7\ 283.20c$	$2.24a$

注:每列数据后小写字母不相同表示显著性在 0.05 水平差异性显著;每列数据有任何相同小写字母表示显著性在 0.05 水平差异不显著。

3 结论

测坑试验结果表明:冬小麦耗水量随着灌水量的增加而增加,测坑试验设置的灌水总量范围为 $3\ 900\sim 4\ 500\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,在此灌溉范围内产量随着灌水量的增加而增加,作物产量是高水处理 T_1 最高,水分利用效率却是中水处理 T_2 最大,通过方差分析可得灌水量最多的处理虽获得最大产量,但与中水处理的产量并未达到显著性差异水平,由此可见,在一定灌水总量的范围内,较小的灌水量可获得较高的水分利用效率。

田间试验分析发现:灌水下限为 55% 田间持水率的 S_H 、 S_M 及 S_L 处理,冬小麦水分利用效率普遍高于灌水下限为 65% 田间持水率的 N_H 、 N_M 及 N_L

处理,灌溉方式采用土壤湿润层有效含水量控制下限为 55% 进行灌水较为适宜。 N_H 处理冬小麦产量为 $9\ 582.70\ \text{kg}/\text{hm}^2$, S_M 处理冬小麦产量为 $9\ 520.03\ \text{kg}/\text{hm}^2$,产量间差异较小,但 N_H 处理水分利用效率最低,为 $2.33\ \text{kg}/\text{m}^3$, S_M 处理水分利用效率最高,其值达到了 $2.85\ \text{kg}/\text{m}^3$,由此可见, S_M 处理是试验条件下较优的灌溉处理,适宜的灌水定额在高效节水的同时也可以实现高产,这与测坑试验得出的较小的灌水量可获得较高的水分利用效率结果相一致。

在调控膜的作用下灌溉水分主要保留在滴灌管理设深度,较大流量会造成水分大量下渗,试验结果表明较小的灌水量可获得较高的水分利用效率,综合考虑产量和水分利用效率,确定在试验年度作物生育期有效降雨量为 110 mm 左右的情况下,冬小麦较优的灌水定额应为 $450\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,灌水时期分别是返青、拔节、抽穗、灌浆 4 个时期,灌水次数为 4 次,灌溉定额为 $1\ 800\ \text{m}^3/\text{hm}^2$,可达到节水高产的效果。

参考文献:

- [1] 张凯,曾昭海,赵杰,等.华北平原压采地下水对小麦生产的影响分析[J].中国农业科技导报,2016,18(5):111-117. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2016.054.
- [2] 赵晗,刘玉春,吴迪,等.河北省5个县域冬小麦-夏玉米连作灌溉需水特性分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):185-194. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0086.
- [3] 陈飞,羊艳,史文龙,等.河北省地下水超采综合治理农业措施压采效果与技术经济性分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(5):1019-1026. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0101.
- [4] 杨会峰,孟瑞芳,李文鹏,等.海河流域地下水资源特征和开发利用潜力[J].中国地质,2021,48(4):1032-1051. DOI: 10.12029/gc20210404.
- [5] 孙章浩,黄令森,杨培岭,等.地下滴灌灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长发育的影响[J].中国农业大学学报,2019,24(11):41-50. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2019.11.05.
- [6] 杨宏伟,李思恩.多年膜下滴灌对土壤水盐及棉花产量的影响[J].节水灌溉,2022(10):79-85. DOI: 10.12396/jsgg.2022.153.
- [7] 肖怀玺.地下滴灌技术在农田水利建设中的设计与应用[J].黑龙江水利科技,2017,45(10):119-121,161. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2017.10.044.

- [8] 张凯,刘战东,强小嫚,等. 耕作方式和灌水处理对冬小麦-夏玉米水分利用及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 102-109. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.17.013.
- [9] 冯素伟,刘朝阳,胡铁柱,等. 畦田补灌对冬小麦产量形成及水分利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2022, 37(3): 112-118. DOI: 10.7668/hbnxb.20192555.
- [10] 王雪,陈国栋,张金龙,等. 枣园间作条件下不同灌水处理对紫花苜蓿产量及水分利用率影响[J]. *新疆农业科学*, 2016, 53(12): 2187-2193. DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2016.12.004.
- [11] 王荣莲,张智超,嘉晓辉,等. 地下滴灌水分运移规律及滴灌带适用性初步研究[J]. *节水灌溉*, 2017(10): 31-34. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2017.10.008.
- [12] 要家威,齐永青,李怀辉,等. 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(6): 1076-1084. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200980.
- [13] 王显超,杨冬. 地下滴灌技术及其应用[J]. *黑龙江科学*, 2020, 11(8): 50-51. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2020.08.024.
- [14] 牛靖冉,王春霞,何新林,等. 膜下滴灌技术综合效益评价方法初步研究[J]. *节水灌溉*, 2019(1): 118-122. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2019.01.024.
- [15] 仵峰,彭贵芳,宰松梅,等. 灌溉的趋势: 微灌[J]. *节水灌溉*, 2008(6): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2008.06.001.
- [16] 张西平,绳莉丽,甄文超,等. 不同灌水定额对河北省山前平原区冬小麦耗水规律和产量的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2015, 38(5): 101-104, 115. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2015.0121.
- [17] 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. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020.565.
- [18] 张彦. 膜下滴灌技术以及大田膜下滴灌高效节水系统研究[J]. *农业科技与信息*, 2022(7): 50-52, 58. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2022.07.032.
- [19] 杨庭瑞,赵经华,庞毅,等. 地下滴灌深播小麦出苗及生长状况研究[J]. *节水灌溉*, 2020(12): 94-98. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2020.12.019.
- [20] 强小嫚,孙景生,宁慧峰. 水分下限对西瓜/棉花间作水分生产效率及土地利用的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(12): 39-44. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2016.12.008.
- [21] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. *中国新技术新产品*, 2014, 271(9): 184. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2014.09.152.
- [22] 刘战东,张凯,米兆荣,等. 不同土壤容重条件下水分亏缺对作物生长和水分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 115-120. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.02.019.
- [23] 刘海颖,冯举伶,侯君佑,等. 不同灌水量及覆膜处理对啤酒大麦生长的影响[J]. *农业科技与信息*, 2018, 557(24): 39-41. DOI: 10.15979/j.cnki.cn62-1057/s.2018.24.017.
- [24] 武剑. 河北平原区冬小麦合理灌溉制度试验研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(4): 785-787, 797. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2015.04.039.
- [25] 呼红伟,蔡焕杰,王鑫宇,等. 不同氮肥条件下补充灌溉对冬小麦生长、产量和WUE的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(7): 51-59. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2019342.

Effects of subsurface membrane regulated moist irrigation on water consumption pattern and water use efficiency of winter wheat

ZHANG Yabing¹, CHENG Wuqun¹, WU Xianbing¹, TAO Zhi¹, HOU Zhenjun², CHEN Li², ZHAO Yifan¹

(1. *Urban and Rural Construction, Hebei Agricultural University College, Baoding 071000, China;*

2. *Baoding Irrigation Experiment Station, Baoding 071000, China*)

Abstract: Underground film control irrigation is an irrigation technique that combines drip irrigation and film mulching technology by burying the drip irrigation pipe underground. The upper and lower layers of the control film are square impermeable polyethylene film, 25 cm x 40 cm, with a permeable substrate layer of filter cotton in the middle and the same size as the upper film. The drip head is designed for a flow rate of 2.0 L/h and a spacing of 80 cm. After the drip irrigation pipe is placed in the ground at 35 cm, the upper and lower films are placed at the top

and bottom of the drip head respectively, and the symmetrical centres of the upper and lower films coincide with the drip head. The principle of underground film regulated wet irrigation is to use the water absorption force of soil water to make water and fertilizer stay and evenly distribute in the main root layer of the crop, which will help the root system to fully absorb and use water resources, thus reducing the loss of ineffective water and fertilizer, and play an important role in promoting the solution of the problem of water scarcity in agriculture in the North China Plain.

This experiment was divided into a pit test and a field test. The pit test used 9 pits of 2 m×3.33 m, and the test factor was total irrigation control, with three treatments of total irrigation level: 4 500 m³/hm² (T₁), 4 200 m³/hm²(T₂) and 3 900 m³/hm²(T₃). The plots were randomly arranged in nine test pits. The trial field was 44.2m wide from east to west and 64 m long from north to south, covering an area of about 4 acre. The three irrigation level treatments were 540 m³/hm² (H), 450 m³/hm² (M) and 360m³/hm² (L), using an orthogonal test design with six treatments, each replicated three times, in a total of 18 plots, each 30 m long and 5 m wide, with a plot area of 150 m². The pit and field tests were conducted to investigate the water consumption, water intensity and modal coefficients of winter wheat at various stages of fertility under underground film-controlled wet irrigation, to investigate the effects of different water supply conditions on crop yield and water use efficiency, and finally to propose suitable irrigation quotas and irrigation systems for the crops studied under underground film-controlled wet irrigation technology.

The results of the pit test showed that the water consumption and yield of winter wheat increased with the increase of irrigation water within a certain irrigation range, the crop yield was the highest in the high water treatment T₁, but the water use efficiency was the highest in the medium water treatment T₂. The analysis of variance showed that the treatment with the highest irrigation amount achieved the highest yield but did not reach a significant difference with the medium water treatment. In the field trials, the water use efficiency of S_H, S_M and S_L with a lower irrigation limit of 55% field water holding capacity was generally higher than that of N_H, N_M and N_L with a lower irrigation limit of 65% field water holding capacity. The N_H treatment had the lowest water use efficiency of 2.33 kg/m³ and the S_M treatment had the highest water use efficiency of 2.85 kg/m³. This shows that the S_M treatment was the better irrigation treatment under the experimental conditions.

This is in line with the results of the pit test, which showed that a smaller irrigation rate can achieve higher water use efficiency. Under the S_M treatment, the yield of winter wheat could reach 9 520.03 kg/hm² and the water use efficiency could reach 2.85 kg/m³, which could provide a reasonable reference for exploring efficient and feasible irrigation methods for wheat cultivation in water-scarce areas.

Key words: membrane regulated moist irrigation; winter wheat; water consumption pattern; yield; irrigation quota