

文章编号: 2097-096X(2025)04-0373-10

膜调控地下滴灌对冬小麦耗水和产量的影响研究

姚亚丽¹, 绳莉丽², 邵薇薇¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038;

2. 河北农业大学, 河北 保定 071000)

摘要: 农业灌溉耗水量巨大, 在农田建设中推广应用高效节水灌溉技术是解决水资源短缺的关键。本研究以华北地区冬小麦为研究对象, 基于地下滴灌技术+膜调控技术, 研究膜调控地下滴灌技术对冬小麦耗水和产量的影响。研究结果显示, 在膜调控地下滴灌技术下, 冬小麦棵间蒸发强度在整个生育期内一直处于一个较低水平, 日平均棵间蒸发强度比传统畦灌减少了32.73%~40.00%; 与传统畦灌相比, 膜调控地下滴灌技术冬小麦的耗水量同比减少了15.00%~19.14%, 产量同比最大可提高19.46%, 水分利用效率同比提高了22.72%~40.40%; 此外, 膜调控地下滴灌技术下, 冬小麦基础作物系数 K_{cb} 随着生育阶段的推进呈现出先增大后减小的趋势, 与FAO-56推荐值的变化趋势基本相符。膜调控地下滴灌技术具有显著节水和增产效应, 符合国家节水行动的要求, 为雄安新区及河北平原区的农业水资源管理提供新思路。

关键词: 膜调控地下滴灌技术; 冬小麦; 耗水规律; 作物产量; 水分利用效率

中图分类号: S275.4

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240169

1 研究背景

水资源短缺是制约全球生态安全与粮食安全的重要因素^[1], 严重限制了人类社会的可持续发展^[2-3], 已成为全世界关注的问题^[4]。农业灌溉属于消耗性用水, 且耗水量巨大^[5-6], 但农业是节水潜力最大的用户。近几十年我国的农业节水技术得到了较快发展^[7-8], 沟灌、喷灌、低压管道输水、滴灌等节水灌溉技术的推广面积逐年增加, 尤其是喷灌和滴灌技术基本实现了水肥一体化^[9], 其中滴灌被普遍认为是目前最节水的灌水技术^[10-12], 但地下滴灌技术存在作物根系向水性导致的滴头外部堵塞问题, 以及系统运行不同阶段管内短暂负压引起的土壤吸附堵塞等问题, 这些问题不仅影响灌溉效率, 还可能导致系统维护成本增加。

河北平原区以种植冬小麦为主^[13], 是我国粮食的主产区^[14], 该地区水资源极度匮乏^[15], 水资源供需矛盾突出, 农业用水是当地用水的主要方式之一。目前, 已有的节水灌溉技术(如喷灌、滴灌等)在河北地区基本农田建设中均有使用, 但由于存在上述缺点很难进行大面积推广应用。调查发现, 由于喷灌和滴灌等节水灌溉设备在农田应用后, 存在利用率低、阻碍田面作业及人为损毁严重等问题, 其在基本农田建设中很少被使用。所以, 目前河北平原区冬小麦仍是以畦灌为主。有调查表明, 由于受品种、水肥供给时机和均匀度等因素影响, 作物的亩均产量波动幅度较大, 该地区冬小麦产量主要在6000~9000 kg/hm²之间, 农田水分利用效率很低。

为了寻求适合在农田基本建设中推广应用的节水灌溉技术, 克服已有节水灌溉技术的主要缺点, 提高农业用水利用率及作物水分生产效率, 本研究对现有的地下滴灌系统进行技术改进, 通过引入调控膜, 构建了膜调控地下滴灌系统。该系统不仅能实现地下均匀供水^[16], 全面湿润作物主要根系层土壤, 还可以避免灌水器由于土壤颗粒在负压作用下反向运动和作物根系向水性生长造成的堵塞问

收稿日期: 2024-08-28; 网络首发日期: 2024-12-27

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241226.1555.001>

基金项目: 河北雄安新区课题示范项目

作者简介: 姚亚丽(1994-), 博士生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 17832175116@163.com

通信作者: 绳莉丽(1974-), 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: lily197419@126.com

题^[17]，具有诸多优点，与国家节水行动和粮食安全目标高度契合。本试验以冬小麦为研究对象，针对灌溉量对膜调控地下滴灌系统下冬小麦耗水与产量的影响进行试验研究，为指导调整试验区农田作物种植结构，制定合理的灌溉计划，施行科学有效的管理提供理论和数据支持。

2 材料与方方法

2.1 试验区概况 本研究的试验区位于雄县大阴村，试验田处在田间公路的交汇处，试验区面积约为30亩。试验区位于雄县南部，紧邻高速，交通便利，其位置详见图1。雄县位于河北省中部，地势以平原为主，以西南向东北走向。雄县年平均气温大约为12.5℃，有效积温在2500℃左右，降水量大约为600mm，无霜期132d，属于温带大陆性气候。

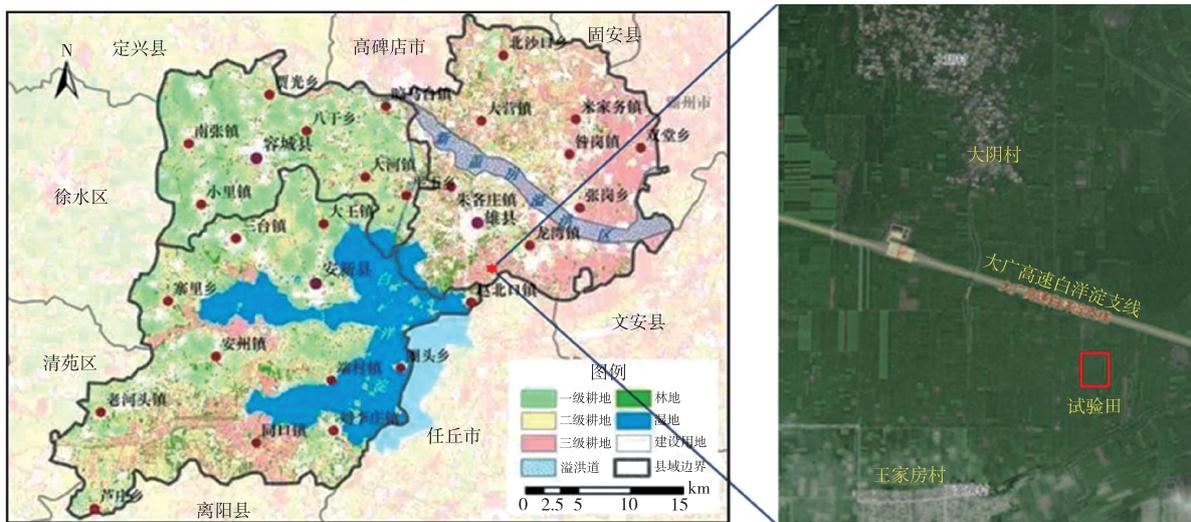


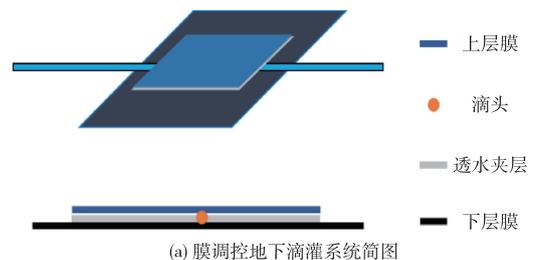
图1 试验区位置图

Fig. 1 Location map of the project area

2.2 试验方案设计

2.2.1 试验材料与试验布置 本试验田选用“中麦175”冬小麦品种，该品种具有抗寒、抗旱、早熟、高产等特性，采用15cm等行距播种，播种深度10cm，播种量为300kg/hm²，试验田采用膜调控地下滴灌系统灌水施肥。膜调控地下滴灌技术是基于地下滴灌技术的进一步改良。该系统通过在地下滴灌系统的滴头处分别安装上膜和下膜，有效预防了滴头堵塞的问题。膜调控地下滴灌管采用PE滴灌管，埋深35cm，毛管间距80cm。地下膜位于滴头处，上膜为20cm×20cm的规格，下膜为40cm×40cm的规格，滴头间距80cm，滴头流量是2.4L/h。膜调控地下滴灌系统简图及现场布置图见图2。

2.2.2 试验设计 河北平原冬小麦整个生育期一般需要灌300~450mm的灌溉水。本次大田试验以灌水量为因素，设置3个灌水水平处理，T1、T2和T3，CK为对照处理(当地传统畦灌)。由于受地形条件的影响，T1处理对应面积为2743.5m²，T2处理对应面积为5626.5m²，T3处理对应面积为5626.5m²，CK处理对应面积为1733.0m²。试验田冬小麦各生育阶段灌水设计见表1。



(a) 膜调控地下滴灌系统简图



(b) 膜调控地下滴灌系统现场布置图

图2 膜调控地下滴灌系统简图及现场布置图

Fig. 2 Schematic diagram and site layout of Membrane-Regulated Underground Drip Irrigation system

表1 冬小麦不同生育期灌水设计(单位:mm)

Table 1 Irrigation design for different growth periods of winter wheat(unit:mm)

处理	返青期(1次灌水量)	拔节期(2次灌水总量)	抽穗期(3次灌水总量)	灌浆期(2次灌水总量)	总灌水量
T1	22.5	52.5	82.5	52.5	210.0
T2	22.5	45.0	75.0	45.0	187.5
T3	22.5	37.5	67.5	37.5	165.0
CK	90.0	90.0	90.0	90.0	360.0

本次试验采用当地地下水作为灌溉水源,各处理根据土壤田间持水量的90%来设定灌水定额。为确保灌水量的准确性,每个处理组的进水口均安装了水表,以便精确控制灌水量。

2.3 数据收集与测定 本试验田使用WN—2210型自动气象站对试验田气象数据进行全天候现场监测,采集的气象资料包括风向、风速、雨量、气温、相对湿度、气压等气象要素;作物生长参数以冬小麦的产量为重点进行测定;土壤水分数据采用取土烘干法收集,灌水前后,水平方向从滴头处每隔10 cm取土,垂直方向从地面每隔10 cm取土,进行含水率测定,其中,滴头处,上膜边缘处,为了不破坏系统调控膜,取样深度只取到30 cm处。试验区每个处理随机选择3个重复点进行土壤含水率数据采集。

2.4 指标计算

2.4.1 土壤含水率和参考作物蒸散量计算 试验区灌水前后采用烘干法测定土壤含水率情况。参考作物蒸散发 ET_0 依据FAO推荐的Penman-Monteith公式进行计算^[18]。

2.4.2 有效降雨的计算 本次试验中试验田的降雨量和降雨时间由气象站监测得到,有效降雨量的计算数据来自土壤水分物联网监测系统所测得的土壤深度为10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm处的含水率。有效降雨量 P_0 计算公式如下:

$$P_0 = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) \quad (1)$$

式中: i 为土层编号; n 为总土层数; γ_i 为第 i 层土壤容重, g/cm^3 ; H_i 为第 i 层土壤厚度,cm; θ_{i1} 为降雨前第 i 层的土壤含水量; θ_{i2} 为降雨后第 i 层的土壤含水量^[19]。

2.4.3 作物棵间蒸发的计算 本试验田冬小麦的棵间蒸发数据采用微型蒸渗仪测定,为保证微型蒸渗仪内筒的土壤含水量与田间土壤含水量相同,每7 d更换一个内筒土柱,降雨或灌水后要加换土柱。为使测量的作物棵间蒸发数据准确,在试验田每个处理随机选取3个地方放置微型蒸渗仪进行测定,作物棵间蒸发公式如下:

$$E = \frac{\Delta W}{\pi r^2} \quad (2)$$

式中: E 为棵间蒸发; ΔW 为两天测得的微型蒸渗仪内筒土柱的质量差; r 为内筒内径。

2.4.4 作物耗水量的计算 测定作物各生育阶段初和阶段末的土壤水分含量,依据农田水量平衡方程计算作物阶段耗水量。计算公式如下:

$$ETc = Pe + I + G - \Delta W \quad (3)$$

式中: ETc 为作物阶段耗水量,mm; Pe 为阶段有效降水量,mm; I 为阶段有效灌水量,mm; G 为阶段补水量,mm,由于试验区的地下水位在地表13 m以下,因此本试验认为没有土壤毛管水的补充, $G=0$; ΔW 为土壤水分在某生育阶段的减少量。

2.4.5 作物系数计算 利用双作物系数法计算作物系数。其作物系数的计算公式如下:

$$ETc = (Ks \cdot Kcb + Ke)ET_0 \quad (4)$$

式中: ETc 为双作物系数法估算的作物耗水量,mm/d; Ks 为土壤水分胁迫系数,无量纲,它代表了水分胁迫对作物蒸腾的影响。本试验中冬小麦阶段消耗水量小于阶段有效灌水量,故认为试验田土壤水分充足, $Ks=1$; Kcb 为作物进行蒸腾作用的基础作物系数,是作物在不发生土壤蒸发,只进行蒸腾作

用的条件下，即土壤表面干燥，水分仅可以支持作物进行蒸腾作用时，作物耗水量与参考作物蒸散量的比值， $K_{cb}=K_c-K_e$ ； K_e 为土壤蒸发系数，反映了土壤蒸发对作物系数的影响， $K_e=E/ET_0$ 。

2.4.6 水分利用效率计算 冬小麦的水分利用效率可通过测量冬小麦的产量(籽粒重量)和整个生育期内消耗的水量来计算。计算公式如下：

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (5)$$

式中： WUE 为水分利用效率， $kg/(hm^2 \cdot mm)$ ； Y 为冬小麦产量， kg/hm^2 ； ET 为冬小麦生育期耗水量， mm 。

3 结果与分析

3.1 膜调控地下滴灌下冬小麦耗水规律研究

3.1.1 作物棵间蒸发的计算 土壤蒸发是指存在于下垫面水体、土壤及其它地表覆盖物之中的水分扩散到大气中的过程^[20]。量化土壤蒸发对于准确计算作物蒸散量，分析田间水热分布状况^[21]、评估作物耗水量^[22]，及时监测作物干旱情况，制定适宜的灌溉制度^[23]，实现农业水资源的合理分配和利用具有指导意义^[24]，是节约农田用水的关键。试验田各处理冬小麦不同生育阶段棵间蒸发量见表2。

T1、T2、T3和CK处理下冬小麦全生育期棵间蒸发量分别为89.92 mm、89.74 mm、79.80 mm和132.47 mm，棵间蒸发系数分别为0.13、0.13、0.11和0.19，平均日蒸发量分别为0.37 mm/d、0.37 mm/d、0.33 mm/d和0.55 mm/d。冬小麦整个生育期，试验田作物棵间蒸发强度波动变化，波动范围在0.20 mm/d~1.36 mm/d之间，具体表现为先减小后增大再减小。与传统畦灌相比，膜调控地下滴灌系统由于毛管埋深35 cm，灌溉水上升到地表需要时间，试验田表层土壤含水率相对较低，作物棵间蒸发强度在冬小麦的整个生育期内一直处于一个较低水平，T1、T2和T3处理的冬小麦全生育期棵间蒸发系数是CK处理的57.89%~68.42%，日平均棵间蒸发强度较CK处理的日平均棵间蒸发强度减少了32.73%~40.00%，膜调控地下滴灌有效减少了土壤水分的棵间蒸发。

3.1.2 作物耗水量的计算 由于试验田的土壤特性、试验区的气候条件以及作物自身的生理特性不同，作物在每个生育阶段的耗水量也不相同。作物耗水量是指作物在某一天或者某一阶段为了满足自

表2 冬小麦各处理棵间蒸发
Table 2 Evaporation among different treatments of winter wheat

	生育期	出苗期	越冬期	返青期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	全生育期
日蒸发/(mm/d)	T1	0.58	0.24	0.31	0.26	0.54	0.78	0.73	0.37
	T2	0.54	0.28	0.31	0.23	0.45	0.73	0.68	0.37
	T3	0.51	0.20	0.28	0.20	0.45	0.84	0.64	0.33
	CK	0.61	0.32	0.54	0.53	0.84	1.36	1.03	0.55
阶段蒸发/mm	T1	16.68	27.19	8.89	7.67	8.17	14.06	7.27	89.92
	T2	15.69	31.72	8.88	6.90	6.68	13.05	6.82	89.74
	T3	14.91	22.66	7.99	6.14	6.69	15.05	6.36	79.80
	CK	17.69	35.84	15.66	15.90	12.60	24.48	10.30	132.47
ET_0/mm		98.09	226.57	44.39	76.69	94.24	78.4	75.44	693.83
K_e	T1	0.17	0.12	0.20	0.10	0.09	0.18	0.10	0.13
	T2	0.16	0.14	0.20	0.09	0.07	0.17	0.09	0.13
	T3	0.15	0.10	0.18	0.08	0.07	0.19	0.08	0.11
	CK	0.18	0.16	0.35	0.21	0.13	0.31	0.14	0.19

身的生长发育所消耗的水量。试验田冬小麦各生育阶段耗水量见表3。

表3 各处理冬小麦阶段耗水量和日耗水量

Table 3 Water consumption and daily water consumption of winter wheat in each treatment

	生育期	出苗期	越冬期	返青期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	全生育期
T1	阶段耗水量/mm	20.50	70.71	35.20	76.30	87.54	40.27	44.08	374.60
	日耗水量/mm	0.71	0.63	1.21	2.54	5.84	2.24	4.41	1.54
T2	阶段耗水量/mm	20.09	66.72	33.28	82.35	81.61	35.16	49.98	369.19
	日耗水量/mm	0.69	0.60	1.15	2.75	5.44	1.95	5.00	1.52
T3	阶段耗水量/mm	19.00	57.82	21.50	78.11	85.33	50.19	44.53	356.48
	日耗水量/mm	0.66	0.52	0.74	2.60	5.69	2.79	4.45	1.47
CK	阶段耗水量/mm	25.60	81.89	37.94	83.04	104.46	58.73	48.62	440.28
	日耗水量/mm	0.88	0.73	1.31	2.77	6.96	3.26	4.86	1.81

由表3可知，试验田各处理冬小麦全生育期耗水量分别为374.60 mm、369.19 mm、356.48 mm和440.28 mm，日耗水量分别为1.54 mm/d、1.52 mm/d、1.47 mm/d和1.81 mm/d。随着冬小麦生育阶段的推进，各处理阶段日耗水量波动变化；各处理阶段耗水量呈现出先增大后减小再增大后减小的趋势，整体变化趋势为“M”型。T1、T2、T3和CK处理日耗水量于抽穗期达到最大，最大值分别为5.84 mm/d、5.44 mm/d、5.69 mm/d和6.96 mm/d；各处理阶段耗水量也在抽穗期最大，最大值分别为87.54 mm、81.61 mm、85.33 mm和104.46 mm。保证冬小麦需水关键期的水分充足才能对冬小麦的增产、增收起到积极促进作用。从冬小麦整个生育期的耗水量来看，T1、T2和T3处理的耗水量较CK处理减少了14.92%~19.03%，膜调控地下滴灌相对于畦灌减少了农田水分消耗。

3.1.3 冬小麦作物系数确定 作物系数由作物本身的生长特性、作物生长阶段以及试验田的气象因素决定，随生育阶段中的参考作物蒸散量和作物耗水量的变化而变化，是作物耗水量与参考作物蒸散量的比值，在FAO双作物系数法中考虑了灌水和降水对土壤蒸发的影响。试验田冬小麦生长初期、生长中期及生长后期各处理基础作物系数见表4。

由表4可知，随着生育阶段的推进，各处理基础作物系数呈现出先增大后减小的趋势。试验田冬小麦整个生育期内的 K_{cb} 变化趋势与FAO-56推荐值的变化趋势基本相符。在冬小麦生长初期阶段，T1、T2、T3及CK处理的 K_{cb} 值分别为0.15、0.12、0.12和0.16。在冬小麦的生长初期阶段，植株刚刚生长，其根系和叶片尚未充分发展，蒸腾作用相对较弱。此时土壤覆盖度低，土壤蒸发强调较大，基础作物系数相对较低；生长中期阶段，随着试验田温度的升高，冬小麦的耗水需求增大， K_{cb} 值明显升高，T1、T2、T3及CK处理的 K_{cb} 值分别为0.81、0.81、0.76和0.84。此时，植株的生理活动增强，植株快速生长，叶面积显著增加，作物需要更多的水分来支持其生长和发育，蒸腾作用逐渐成为主要的水分消耗方式。由于试验田含有较多黏土成分的土壤，这些土壤可能导致根系发育不良，进而影响冬小麦的蒸腾作用，导致 K_{cb} 值低于FAO推荐的标准值；生长后期阶段，T1、T2、T3处理的 K_{cb} 值分别为0.41、0.42、0.48和0.47。在冬小麦的生长后期，随着作物逐渐成熟，叶片逐渐衰老，蒸腾作用减弱。因此，基础作物系数再次降低。这一阶段的植株已经接近收获期，对水分的需求相对减少。有研究人员通过研究表明，作物系数与灌溉量呈正相关的关系^[25]，这与本试验的试验结果一致，本试验中作物系数的变化趋势与灌溉量的变化趋势基本一致。本试验基于双作物系数法确定的 K_{cb} 值对雄安地区冬小麦耗水规律的研究、灌水量的估算具有指导作用。

3.2 不同灌水处理对膜调控地下滴灌冬小麦产量的影响 在探讨不同灌水处理对冬小麦产量的影响时，本试验通过设置T1、T2、T3和CK四种处理方式，深入分析了灌水量与产量之间的关系。试验结果显示，膜调控地下滴灌条件下冬小麦产量随着灌水量的增加呈现出增长趋势，见图3。

表4 冬小麦生长初期、生长中期及生长后期各处理基础作物系数

Table 4 Basic crop coefficients of each treatment in the early, middle and late growth stages of winter wheat

生育阶段		生长前期(出苗期、越冬期)	生长中期(返青期、拔节期、抽穗期)	生长后期(灌浆期、成熟期)
<i>ETc/mm</i>	T1	91.21	199.04	84.35
	T2	86.81	197.24	85.14
	T3	76.82	184.94	94.72
	CK	107.49	225.44	107.34
<i>E/mm</i>	T1	43.86	24.73	21.33
	T2	47.41	22.46	19.87
	T3	37.57	20.82	21.41
	CK	53.53	44.16	34.78
<i>ET₀/mm</i>		324.66	215.32	153.84
<i>Kc</i>	T1	0.28	0.92	0.55
	T2	0.27	0.92	0.55
	T3	0.24	0.86	0.62
	CK	0.33	1.05	0.70
<i>Ke</i>	T1	0.14	0.11	0.14
	T2	0.15	0.10	0.13
	T3	0.12	0.10	0.14
	CK	0.17	0.21	0.23
<i>Kcb</i>	T1	0.15	0.81	0.41
	T2	0.12	0.81	0.42
	T3	0.12	0.76	0.48
	CK	0.16	0.84	0.47

具体来看，T1处理下的冬小麦产量达到了8358.33 kg/hm²，相较于其他处理组表现出了较高的产量水平。这主要得益于T1处理中相对较多的灌水量，为小麦的生长提供了充足的水分条件，从而促进了光合作用的进行和营养物质的积累，最终实现了产量的提升。然而，需注意的是，当灌水量降至T2处理水平时，产量显著下降，T2处理的产量仅为7356.67 kg/hm²。这一结果表明，较低的灌水量可能无法满足冬小麦生长的基本需求，从而导致产量大幅降低。进一步观察发现，随着T3处理的灌水量进一步减少，其产量也相应降至6950.00 kg/hm²，进一步印证了灌水量与产量之间的密切关系。与CK处理相比，T1、T2、T3处理下冬小麦产量的提高幅度分别为-0.65%至19.46%。其中，T3处理的产量低于CK处理，一方面可能是由于T3处理的灌水量最少，难以满足冬小麦在生长关键期对水分的需求造成的；另一方面，由于T3处理地块的土壤条件相对较差，土壤贫瘠且养分不足，这也在一定程度上限制了冬小麦的生长潜力和产量表现，故在一定范围内增加灌水量可以促进冬小麦产量的提高。在实际生产中，应根据当地的土壤条件、气候特点以及冬小麦的需水规律等因素，科学合理确定灌水量，以实现冬小麦产量的最大化。同时，对于土壤贫瘠的地区，还应加强土壤改良和养管理，以提高土壤的肥力水平和作物的生长潜力。

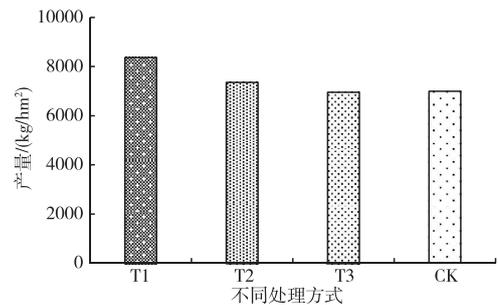


图3 各处理冬小麦产量

Fig. 3 Winter wheat yield of each treatment

3.3 不同灌水处理对膜调控地下滴灌冬小麦水分利用效率的影响 本研究通过实施 T1、T2、T3 和 CK 处理四种不同的灌溉策略，详细分析了膜调控地下滴灌条件下，灌水量与冬小麦水分利用效率之间的相互关系。图 4 为不同处理下冬小麦水分利用效率情况，由图可知，T1、T2、T3 处理下的作物水分利用效率分别为 22.31 kg/(hm²·mm)、19.93 kg/(hm²·mm) 和 19.50 kg/(hm²·mm)，均显著高于 CK 处理下的 15.89 kg/(hm²·mm)。这一结果表明，膜调控地下滴灌技术能够有效提高冬小麦的水分利用效率，减少水资源的浪费。

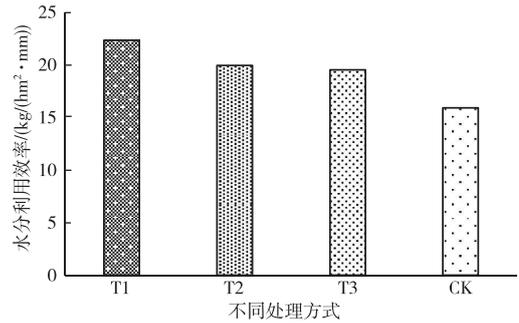


图 4 不同处理下冬小麦水分利用效率情况
Fig. 4 Water use efficiency of winter wheat under different treatments

具体而言，T1 处理下的水分利用效率最高，达到了 22.31 kg/(hm²·mm)，这主要得益于其相对较多的灌水量。适量的灌水不仅满足了小麦生长的需求，还促进了根系对水分和养分的吸收，从而提高了水分利用效率。相比之下，T2 和 T3 处理虽然灌水量有所减少，但水分利用效率仍然保持较高水平。比较 T1、T2、T3 处理和 CK 处理，发现传统畦灌的冬小麦水分利用效率普遍低于膜调控地下滴灌技术下冬小麦水分利用效率。进一步分析发现，T1、T2、T3 处理较 CK 处理水分利用效率分别增大了 40.40%、25.42% 和 22.72%。这是因为传统畦灌方式下水分蒸发和渗漏损失较大，导致实际被小麦吸收利用的水分较少；另一方面，传统畦灌往往无法实现精准灌溉，难以满足小麦生长的关键时期对水分的需求。这一结果充分证明了膜调控地下滴灌技术在提高冬小麦水分利用效率方面的显著优势。通过精确控制灌水量，该技术能够最大限度地减少水分损失，提高水分的利用率。

4 结论

本试验在膜调控地下滴灌系统下，以冬小麦为研究对象，通过观测冬小麦不同生育阶段的土壤水分分布情况、微气象数据和植株产量等，分析得到不同灌水条件下各生育阶段作物棵间蒸发量、耗水量、作物系数 *K_{cb}* 的动态变化及产量情况，研究了膜调控地下滴灌系统对冬小麦耗水和产量的影响。本试验条件下，主要结论为以下几点：

(1) 在 T1、T2、T3 和 CK 处理下，冬小麦全生育期日平均蒸发量分别为 0.37 mm/d、0.37 mm/d、0.33 mm/d 和 0.55 mm/d，T1、T2 和 T3 处理较 CK 处理的冬小麦日平均棵间蒸发强度减少了约 0.2 mm/d，膜调控地下滴灌减少了土壤水分的棵间蒸发；从冬小麦整个生育期的耗水量来看，T1、T2 和 T3 处理冬小麦全生育期耗水量较 CK 处理减少了 15.00%~19.14%，膜调控地下滴灌相对于畦灌减少了农田作物水分消耗。

(2) 随着冬小麦生育阶段的推进，试验田各处理的 *K_{cb}* 变化趋势与 FAO-56 推荐值基本一致。在生长初期、生长中期和生长后期，T1、T2、T3 及 CK 处理的 *K_{cb}* 值分别为 0.15、0.12、0.12 和 0.16，0.81、0.81、0.76 和 0.84，以及 0.41、0.42、0.48 和 0.47。本研究基于双作物系数法确定的 *K_{cb}* 值对雄安新区冬小麦耗水规律的研究和灌水量估算具有指导作用。

(3) 与传统畦灌相比，膜调控地下滴灌技术提高了冬小麦的产量，其增产比例最高可达 19.46%。膜调控地下滴灌技术还极大地提升了作物水分利用效率，T1、T2 和 T3 处理较 CK 处理水分利用效率分别增大了 22.72%~40.40%，膜调控地下滴灌技术在提高冬小麦水分利用效率方面优势显著。

本文虽探究了膜调控地下滴灌试验对冬小麦耗水和产量的影响，但由于客观条件的限制，本文并没有将其与地下滴灌进行试验对比。因此将该技术应用到田间作物时，尚需要考虑到该系统的使用会相应地增加一定的材料成本以及铺设成本，且相关材料的使用寿命预估约为 2~3 年，从使用寿命的角度来看相对有限。但即便如此，膜调控地下滴灌系统仍具有显著优势，它不仅有力地促进了水资源的可持续利用，能实现农业高效生产与生态环保的双重目标，还能切实保障区域粮食安全，完全符合国家节水行动的要求，为区域绿色发展贡献力量。

参 考 文 献:

- [1] 孙才志, 魏亚琼, 赵良仕. 干旱区水—能源—粮食纽带系统协同演化——以中国西北地区为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 320–333. (SUN Caizhi, WEI Yaqiong, ZHAO Liangshi. Coevolution of water–energy–food linkage system in arid areas: A case study of Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37 (2): 320–333. (in Chinese))
- [2] 赵孝威, 张洪波, 李同方, 等. 中国城市水资源短缺类型与发展轨迹识别——以32个主要城市为例[J]. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2619–2636. (ZHAO Xiaowei, ZHANG Hongbo, LI Tongfang, et al. Identification of urban water shortage types and development trajectories in China: A case study of 32 major cities[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(10): 2619–2636. (in Chinese))
- [3] 贺双燕, 杨晓静, 刘俊钊, 等. 2022年江西省干旱时空演变特征研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 49–62. (HE Shuangyan, YANG Xiaojing, LI Junzhao, et al. Study on the spatial and temporal evolution characteristics of drought in Jiangxi Province in 2022[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(1): 49–62. (in Chinese))
- [4] 吴梦茜, 李桂玲, 蔡甲冰, 等. 玉米浅埋滴灌工程综合效益及对地下水水位影响分析: 以科尔沁区为例[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(5): 490–498. (WU Mengqian, LI Guiling, CAI Jiabing, et al. Comprehensive benefits of shallow covered drip irrigation project and its impact on groundwater dynamic change in corn field of Keerqin district[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(5): 490–498. (in Chinese))
- [5] 党艳艳. 当前山东沿黄区农业灌溉高效节水技术应用效果研究[J]. 农业技术与装备, 2023(4): 47–49. (DANG Jiangyan. Research on the application effect of efficient water–saving technology in agricultural irrigation in the Yellow River Basin of Shandong Province[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2023(4): 47–49. (in Chinese))
- [6] 阳眉剑, 吴深, 于赢东, 等. 农业节水灌溉评价研究历程及展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(3): 210–218. (YANG Meijian, WU Shen, YU Yingdong, et al. Progress and prospect of agricultural water–saving irrigation assessment[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14 (3): 210–218. (in Chinese))
- [7] 李建宝. 节水灌溉技术在农田水利工程中的应用[J]. 河北农机, 2023(24): 129–131. (LI Jianbao. Application of water–saving irrigation technology in farmland water conservancy projects[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2023(24): 129–131. (in Chinese))
- [8] 台淑萍. 基于高效节水灌溉技术在农田水利工程中的实践研究[J]. 当代农机, 2023(11): 93–96. (TAI Shuping. Practical research on efficient water–saving irrigation technology in agricultural water conservancy engineering [J]. Contemporary Agricultural Machinery, 2023(11): 93–96. (in Chinese))
- [9] 王恩生. 农田水利工程中节水灌溉技术应用要点研究[J]. 农业开发与装备, 2023(7): 232–234. (WANG Ensheng. Research on the application of water–saving irrigation technology in farmland water conservancy projects [J]. Agricultural Development and Equipment, 2023(7): 232–234. (in Chinese))
- [10] 郭一航, 赵敬, 诸幼晖, 等. 滴灌灌水器研究进展综述[J]. 现代农业装备, 2023, 44(3): 93–99. (GUO Yihang, ZHAO Jing, ZHU Youhui, et al. Review of research progress of drip irrigation emitters[J]. Modern Agricultural Equipment, 2023, 44 (3): 93–99. (in Chinese))
- [11] 姚振宪, 王三建. 我国滴灌发展历程及建议[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 54–58. (YAO Zhenxian, WANG Sanjian. Development history and suggestions of drip irrigation in my country[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1 (2): 54–58. (in Chinese))
- [12] 杨录国. 高效节水灌溉技术在农田水利工程中的应用[J]. 河北农机, 2021(10): 135–136. (YANG Lugu. Application of efficient water–saving irrigation technology in farmland water conservancy projects[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2021(10): 135–136. (in Chinese))
- [13] LI Binbin, WU Lanfang, ZHU Wanxue, et al. Influence of crop residue management and soil tillage method on reducing the carbon footprint of winter wheat production in the salt–affected arable land in the North China Plain[J]. Agronomy, 2023, 13(4): 1018.

- [14] IQBALM A, SHEN Y, STRICEVIC R, et al. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 135(1): 61–72.
- [15] WANG Xiangping, HUANG Guanhua, YANG Jingsong, et al. An assessment of irrigation practices: Sprinkler irrigation of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159(9): 197–208.
- [16] 张守都, 栗岩峰, 李久生. 基于DNDC模型的东北半湿润区膜下滴灌玉米施肥制度优化[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(2): 113–121. (ZHANG Shoudu, LI Yanfeng, LI Jiusheng. Optimization of fertilizing schedule for maize with mulched drip irrigation in sub-humid region of Northeast China DNDC model[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2018, 16(2): 113–121. (in Chinese))
- [17] 王荣莲, 龚时宏, 于健, 等. 地下滴灌抗根系入侵堵塞的研究进展[J]. *节水灌溉*, 2012(1): 61–63, 67. (WANG Ronglian, GONG Shihong, YU Jian, et al. Research progress on anti-root invasion and blockage of underground drip irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2012(1): 61–63, 67. (in Chinese))
- [18] 杨波, 汤鹏程, 徐冰, 等. 西藏燕麦主要种植区灌溉定额空间分布及影响因素[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2022, 20(5): 464–472. (YANG Bo, TANG Pengcheng, XU Bing, et al. Analysis of spatial distribution and its influencing factors of oat irrigation quota in Tibet region[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2022, 20(5): 464–472. (in Chinese))
- [19] 刘增进, 李宝萍, 李远华, 等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 58–63. (LIU Zengjin, LI Baoping, LI Yuanhua, et al. Study on water use efficiency and optimal irrigation schedule of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(4): 58–63. (in Chinese))
- [20] MOHAWESH O E. Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semi arid environments[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2011, 57(4): 145–52.
- [21] 程强, 徐嫫, 陈超, 等. 越冬期麦田地表蒸散量估算模型适用性分析与参数修正[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 317–325. (CHENG Qiang, XU Qian, CHEN Chao, et al. Applicability analysis and parameter correction of surface evapotranspiration estimation model for wintering wheat fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 317–325. (in Chinese))
- [22] CHEN Xuejuan, MO Xingguo, HU Shi, et al. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(6): 661–680.
- [23] 崔俊杰, 白洁, 郑磊, 等. 新疆地区遥感、融合和陆面模式模拟的蒸散产品的不确定性分析[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 597–605. (CUI Junjie, BAI Jie, ZHENG Lei, et al. Uncertainty analysis of evapotranspiration products based on remote sensing, fusion and land surface model simulation in Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 597–605. (in Chinese))
- [24] 魏晓妹, 降亚楠. 西北灌区地下水资源开发利用研究进展及发展趋势[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(6): 1–10. (WEI Xiaomei, JIANG Yanan. Research progress and development trend of groundwater resources development and utilization in Northwest irrigation areas[J]. *Journal of Water Resources and Architecture*, 2019, 17(6): 1–10. (in Chinese))
- [26] 张仔罗, 文雯, 曹硕, 等. 滴灌灌溉量和频次对小麦—青贮玉米复播体系蒸发蒸腾量和作物系数的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(13): 104–109. (ZHANG Ziluo, WEN Wen, CAO Shuo, et al. Effects of drip irrigation amount and frequency on evapotranspiration and crop coefficient in wheat–silage corn multi-cropping system[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(13): 104–109. (in Chinese))

Study on the effect of membrane-regulated subsurface drip irrigation on water consumption and yield of winter wheat

YAO Yali¹, SHENG Lili², SHAO Weiwei¹

(1. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China)

Abstract: Agricultural irrigation consumes a large amount of water. Popularizing and applying high-efficiency water-saving irrigation technologies in farmland construction is key to addressing water resource shortages. This paper took winter wheat in North China as a case study and, based on subsurface drip irrigation technology and membrane regulation techniques, analyzed the effect of membrane-regulated subsurface drip irrigation technology on water consumption and yield of winter wheat. The results show that compared to traditional border irrigation, the evaporation intensity of winter wheat plants under membrane-regulated subsurface drip irrigation technology remains a relatively low level in the entire growth period, and the daily average evaporation intensity reduces by 32.73% to 40.00%, the water consumption reduces by 15.00% to 19.14%, the yield of winter wheat increases by up to 19.46%, and the water use efficiency improves by 22.72% to 40.40%. Additionally, the basal crop coefficient (K_{cb}) of winter wheat shows a trend of increasing first and then decreasing under membrane-regulated subsurface drip irrigation technology as the growth stage progresses, and this trend is generally consistent with the change tendency recommended by FAO-56. Membrane-regulated subsurface drip irrigation technology has significant water-saving and yield-increasing effects, meeting the requirements of the national water-saving initiative. The technology can provide new insights into agricultural water resource management in the Xiong'an New Area and the Hebei Plain region.

Keywords: membrane-regulated subsurface drip irrigation technology; winter wheat; water consumption pattern; crop yield; water use efficiency

(责任编辑: 祁伟)

公益广告



绘画: 熊稳

指导: 李贵宝