

膜下滴灌小麦-西兰花复种水肥利用效率

田德龙¹, 侯晨丽^{1,2}, 马 鑫³, 陈鸿福⁴

(1.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;
3.内蒙古自治区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010018; 4.内蒙古包头市防汛抗旱调度(信息)中心, 内蒙古 包头 014030)

摘 要:于 2017 年 4 月—2018 年 9 月连续 2 a 进行田间试验, 以传统畦灌为对照, 开展膜下滴灌不同灌水定额对小麦复种西兰花生长状况、水肥利用效率及效益的影响研究。结果表明:膜下滴灌有利于提高小麦产量和水分利用效率, 较传统畦灌处理分别平均提高 12.6% 和 39.10%, 但随灌水增加, 作物增产效应下降, 耗水量增长率出现回落, 膜下滴灌条件下, 高水处理 ($3\,225\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 小麦获得最大产量, 平均为 $5\,468.57\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但与中水处理 ($2\,700\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 无显著差异 ($P>0.05$); 西兰花中水处理 ($1\,920\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 增产效应最大, 较传统畦灌产量平均提高 15.65%, 水分利用效率和氮肥偏生产力平均增加 40.03% 和 15.65%; 膜下滴灌有利于补充土壤氮库, 增加土壤肥力, 较传统畦灌土壤中 N 肥消耗平均减小 25.52%; 当膜下滴灌定额为 $4\,620\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 小麦-西兰花净产值较传统畦灌处理平均增收 $8\,513.77\text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产投比较传统畦灌处理平均提高 15.30%。

关键词:膜下滴灌; 小麦; 西兰花; 复种; 产量; 水肥利用效率

中图分类号:S275.6; S512.1; S649 **文献标志码:**A

Water and fertilizer utilization efficiency of multicropping wheat and broccoli under drip irrigation and film mulching

TIAN Delong¹, HOU Chenli^{1,2}, MA Xin³, Chen Hongfu⁴

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources Hohhot, Inner Mongolia 010020, China;
2. College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
3. Inner Mongolia Water Conservancy Research Institute, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;
4. Inner Mongolia Baotou Flood Control and Drought Control Center (Information), Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

Abstract: From April 2017 to September 2018, field experiments were conducted to study the effects of different irrigation rates of drip irrigation under film on the growth status, water and fertilizer utilization efficiency and benefits of multicropping wheat and broccoli, and traditional border irrigation was used as a control. The results showed that drip irrigation under film-mulching was beneficial in increasing crop yield and water use efficiency, and compared with traditional border irrigation, the average wheat yield and WUE increase by 12.62% and 39.10%, but with the increase of irrigation amount, the effect of crop yield increase decreased and the growth rate of water consumption decreased. Under mulch-drip irrigation, the maximum yield ($5\,468.57\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) of wheat obtained by high water treatment was not significantly different from that obtained by medium water treatment ($P>0.05$). Compared with traditional border irrigation, the yield increased by 15.65%, water use efficiency and nitrogen partial factor productivity increased by 40.03% and 15.65%, respectively. Mulching drip irrigation was beneficial to supplement soil nitrogen pool, increase soil fertility, and the average consumption of N fertilizer in soil decreased by 25.52% compared with traditional border irrigation. When the drip irrigation quota was $4\,620\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, the average net output value of wheat-broccoli was $8\,513.77\text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, higher than that of traditional border irrigation, and the average output value was 15.30% higher than that of traditional border irrigation.

Keywords: drip irrigation under film; wheat; multicropping; broccoli; yield; water and fertilizer utilization efficiency

水资源短缺是制约农业生产的主要因素之一,特别是干旱地区^[1]。内蒙古河套灌区作为中国粮食重要产区之一,水成为作物获得高产的重要投入和最大制约因素,因此,有效利用灌溉水资源,达到节水增产是解决缺水地区农业发展的有效方法。膜下滴灌技术是当前应用广泛的一种节水灌溉方式^[2],可有效降低棵间无效蒸发,减少生育期耗水,改善土壤水热状况,提高作物产量和水肥利用率^[3],结合水肥一体化技术,在干旱区得到了跨越式的发展^[2]。国内外学者针对膜下滴灌技术,就不同作物生长特性、产量、水肥利用效率以及经济效益等方面已有大量研究^[1-5],并取得了一定成果,但研究多数针对单一作物,针对膜下滴灌条件下不同作物一年两熟复种的水肥高效利用研究较少。复种可有效降低种植成本,提高效益,同时可增加绿色面积,延长植被生产能力,提高了土地空间、光能、热能、生长季节和水肥的利用率^[6-9]。游永亮等^[8]和汤文光等^[9]研究发现复种较单种可提高作物水分利用效率、土地生产力及效益。因此针对膜下滴灌小麦复种经济作物种植模式下水肥利用效率差异研究对河套灌区种植调整过程中水资源的节约及区域农业可持续发展具有重要意义。

小麦是河套灌区主要种植的粮食作物之一,据统计,河套灌区小麦种植面积为 10 万 hm²,占总种植面积的 13.39%,尽管近年小麦种植面积逐渐增加,但是小麦种植需要投入的资源更多,同时小麦生长周期为 120 d 左右,收获后造成农田闲置,使得土地产出率降低,经济效益不具备优势。二茬复种

对土壤水热环境要求较严格,土壤温度较低时,不利于后期作物生长发育,Yang 等^[1]研究表明地膜覆盖可提高土壤温度,尤其在早期,导致小麦生长期的提前和水分利用效率的提高,较不覆膜成熟期提前 3~7 d,因此滴灌覆膜可有效提高复种指数,同时免耕留茬覆膜可提升土壤储水能力,减小地表蒸发,增加土壤温度^[6,10],为复种西兰花的生长提供良好的水热环境。西兰花是一种营养价值较高的秋冬蔬菜,耐热性和抗寒性都较强,适应性广,容易栽培,与农作物相比经济效益好,可适用于小麦收获后种植。因此,本研究以小麦-西兰花复种为研究对象,试验设置 3 个不同滴灌灌水定额与传统畦灌对照处理,分析膜下滴灌条件下不同灌水处理对小麦-西兰花复种产量、耗水量、水肥利用效率、经济效益的影响,旨在为膜下滴灌复种西兰花科学合理灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年 4 月—2018 年 9 月连续 2 a 于内蒙古磴口县三海子进行,试验区为温带大陆性季风气候,干旱少雨,昼夜温差大,光热资源丰富,全年日照时数达 3 181 h,年平均气温 7.6℃,年平均降水量为 138.2 mm,年平均蒸发量 2 096.4 mm,无霜期 136~144 d。2017 年和 2018 年小麦复种西兰花整个生育期总降水量为 56.86 mm 和 86.00 mm,2 a 平均气温分别为 18.45℃和 18.31℃(图 1)。土壤 0~20 cm 土层为砂壤土,20~100 cm 土层为粉壤土,平均容重为 1.52 g·cm⁻³,耕作层 0~30 cm 土层田

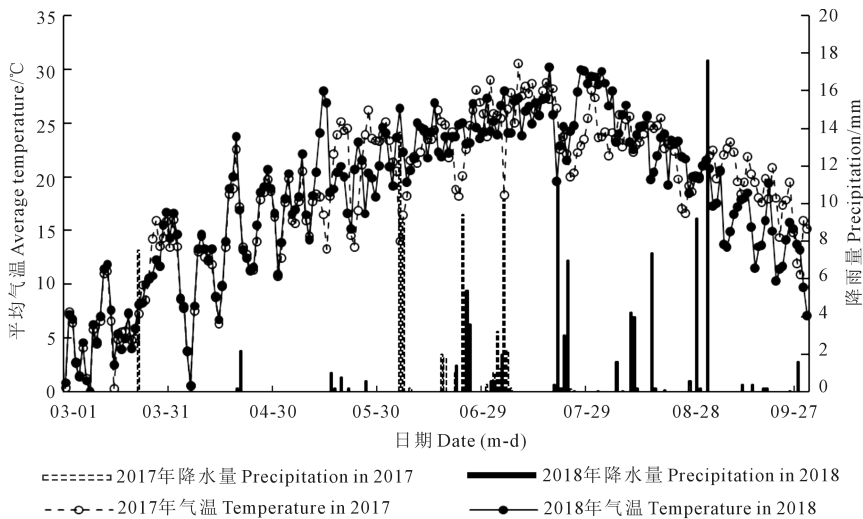


图 1 2017 年和 2018 年试验区 3—9 月降水及气温
Fig.1 Precipitation and temperature from March to September in 2017 and 2018

间持水率为 22%(质量含水率),生育期地下水埋深 300 cm 以下。有机质 7.51 g · kg⁻¹、速效氮 11.33 mg · kg⁻¹、速效磷 31.11 mg · kg⁻¹、速效钾 122.68 mg · kg⁻¹,冬季最大冻土层厚度 1.2 m。

1.2 试验设计

供试小麦永良 4 号采用人工点播,播种量为 300 kg · hm⁻²。试验布置采用“一膜两带”的膜下滴灌模式,地膜宽 170 cm(材质:塑料地膜,厚 0.008 mm),滴灌带间距 60 cm,两膜间行距和穴距均为 12.5 cm,每膜播种 12 行。滴灌带为单翼迷宫式(外径:16 mm,壁厚:0.3 mm),设计流量 2.4 L · h⁻¹,滴孔间距 30 cm,工作压力 50~100 kPa。播种前施入腐熟的有机肥 30 000~45 000 kg · hm⁻²,基肥施肥磷酸二铵 375 kg · hm⁻²和尿素 75 kg · hm⁻²。当地传统播种方式为条播,播种量为 450 kg · hm⁻²,播种前基肥施肥磷酸二铵 525 kg · hm⁻²和尿素 75 kg ·

hm⁻²。膜下滴灌小麦-西兰花复种试验均各设置 3 种灌溉定额,分别为低水处理、中水处理、高水处理,设当地传统畦灌及灌水量为对照(见表 1),灌水量均采用水表控制(精度:0.001 m³),小麦与西兰花灌水次数相同,小麦滴灌 7 次,平均 7 d 滴灌 1 次,西兰花滴灌 7 次,平均 8 d 滴灌 1 次,每个处理均 3 次重复,共 12 个小区,每个小区长 50 m、宽 7 m,各处理随机排列,且各小区间设有 50 cm 宽的隔离带。2 a 小麦播种时间分别为 2017 年 3 月 14 日、2018 年 3 月 10 日;收获时间分别为 2017 年 7 月 10 日、2018 年 7 月 7 日。小麦收获后,闲地 5~6 d,免耕留茬(高度 5 cm)复种西兰花(中青 11 号,5~6 片真叶),西兰花的播种方式为室内培育,野外移栽,移栽前要进行 1 次滴灌,野外移栽的时间分别为 2017 年 7 月 28 日、2018 年 7 月 22 日;收获时间分别为 2017 年 10 月 10 日、2018 年 10 月 7 日。

表 1 膜下滴灌小麦复种西兰花不同灌水处理试验设计

Table 1 Experimental design of different irrigation for multicropping wheat and broccoli under film-mulching drip irrigation							
小麦 Wheat				西兰花 Broccoli			
处理 Treatment	灌溉定额 Irrigation quota /(m ³ · hm ⁻²)	N 肥追施量 N fertilizer application amount /(kg · hm ⁻²)	追肥次数(生育期) Times of fertilization (growth period)	处理 Treatment	灌溉定额 Irrigation quota /(m ³ · hm ⁻²)	N 肥追施量 N fertilizer application amount /(kg · hm ⁻²)	追肥次数(生育期) Times of fertilization (growth period)
W ₁	2175	480	4(分蘖期、拔节期、 抽穗期、灌浆期) 4(tillering, jointing, heading, filling stage)	T ₁	1665	525	3 次(苗期、莲座 期期、花蕾形成 期) 3 times(seedling, rosette, bud forma- tion stage)
W ₂	2700	480		T ₂	1920	525	
W ₃	3225	480		T ₃	2100	525	
CK	4200	600	2(拔节期、灌浆期) 2(jointing, filling stage)	T ₀ (CK)	2100	525	

注:滴灌追肥前应先滴清水 15~20 min,再将提前用水溶解的固体肥加入施肥罐中,追肥完成后再滴清水 30 min,清洗管道,防止堵塞滴头。

Note: Water should be drip irrigation for 15~20 min before fertigation, and then solid fertilizer dissolved in water in advance should be added to the fertilizer tank. After fertigation, there should be another 30 min of drip water to clean the pipeline to prevent blocking the drip head.

1.3 测定内容及方法

1.3.1 基本指标测定 气象数据:试验田附近设气象站(HOBO-U30)自动采集,设定为 1 min 测量一次,每 60 min 平均一次,记录数据包括气温、降雨量、湿度、太阳辐射、大气压、风速等。

土壤含水率:采用烘干称重法,每个处理沿滴灌带平行方向的两根滴灌带中间取样。从开始播种至收获结束每 10 d 观测一次,灌水及降雨前后 12 h 加测。取样土层深度为 0~40 cm,每 10 cm 取 1 个样;40~100 cm 土层每 20 cm 取 1 个样。

土壤 N、P 含量:作物生长季前后,每个处理选

取 3 个测点取土样,土样室内风干,粉碎,过 1 mm 筛,采用紫外可见光分光光度计(UT-1810PC 型)测定土壤中碱解氮、速效磷含量。

小麦产量:成熟期每个处理取 3 个点,每个点分别连续取 10 株小麦,测其单株株高、穗长、穗质量;同时每个处理随机取 1 m² 样方,留茬 10 cm 收割,单打单收,风干籽粒后称百粒质量、穗数与产量,并折算成每公顷产量。

西兰花产量:花球膨大期每个处理取 3 个点,每个点分别连续取 5 株西兰花,用卷尺测量其单株株高、茎粗及花球直径,同时称量单株西兰花鲜重取

平均值,并折算成每公顷产量。

经济效益:记录各处理种子、化肥、农药、地膜、农机及用工、滴灌带、水费、作物当季收购价等数据(数据均为 2017 年、2018 年实际市场调研价格结合试验区各项材料价格及作物收购价格后确定),计算作物投入、产出及产投比,产投比为总产出与种植投入的比值。

1.3.2 相关指标计算方法

(1)各小区耗水量采用水量平衡法计算^[2-3]:

$$ET = \Delta W + P + I - D - R \tag{1}$$

式中, ET 为耗水量(mm); ΔW 为土壤贮水量(mm); P 为有效降雨量(mm); I 为灌溉量(mm); R 为径流量(mm); D 为地下水的补给量和渗漏量(mm)。由于试验期间试验区未发生持续性降雨,地面径流损失(R)可忽略不计;由于灌溉方式为滴灌,且该区域地下水位在 3 m 以下,故忽略地下水补给和渗漏量。

(2)水分利用效率计算:

$$WUE = Y/ET \tag{2}$$

式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$); Y 为产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET 为耗水量(mm)。

(3)氮肥偏生产力(PFP)计算:

$$PFP = Y/F \tag{3}$$

式中, Y 为产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); F 为氮肥投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

(4)土壤养分含量计算:

$$N = 0.15 \times 667 \times \gamma \times h \times m \tag{4}$$

式中, N 为土壤养分含量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); m 为土壤养分质量比($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); γ 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为 0 ~ 40 cm 土层厚度(cm)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 制作图表,用 Spss 17.0 软件进行单因素方差分析;如果差异显著,则采用邓肯氏新复极差检验法进行多重比较,检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 膜下滴灌小麦复种西兰花的产量及其构成要素

灌水量是影响干旱地区作物产量的首要因素,2017 年和 2018 年灌水量对小麦产量及其构成要素影响的变化规律相近(表 2),由表 2 可知,膜下滴灌条件下小麦随灌水量增加产量呈增加趋势,小麦穗

数及百粒重与产量变化趋势基本一致;其中 W2 和 W3 处理产量显著高于 W1 处理($P<0.05$),而 W2 和 W3 处理产量无显著差异($P>0.05$);低水到中水小麦产量 2 a 平均增长 14.05%,而中水到高水 2 a 小麦产量平均增长 5.40%,表明灌水量高相对应的产量较高,但随灌水量的增加对小麦的增产效应明显减小。2 a 膜下滴灌小麦的平均产量为 5 086.15 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较传统畦灌提高 12.62%,其中,2 a W2 和 W3 处理小麦产量较传统畦灌平均分别增产 15.28%和 21.49%,膜下滴灌小麦 2 a 株高、穗数和百粒重表现较好,较传统畦灌平均分别增加 3.09%、11.02%和 2.71%;可以看出地膜覆盖通过改善土壤水热状态^[6],促进作物生长和籽粒干物质积累,最终提升作物产量。

小麦收获后直接在免耕留茬基础上复种西兰花,由表 2 可知,膜下滴灌条件下,2 a 西兰花产量较传统畦灌增加 6.04%,西兰花产量随灌水量增大呈先增加后减小趋势,从低水到中水西兰花产量 2 a 平均增长 27.90%,而从中水到高水西兰花产量 2 a 平均减小 3.19%,W2 处理花球直径显著高于 W1 处理和 W3 处理($P<0.05$),2 a 分别增加 56.38%和 15.29%,说明西兰花产量在一定范围内随灌水量增大而增加,而灌水量过量会使西兰花增产效应下降,甚至导致产量降低。这与徐昭等^[11]的研究基本一致。相同灌水水平下,膜下滴灌 W3 处理产量显著高于传统畦灌($P<0.05$),2 a 较传统畦灌产量平均提高 11.98%,2017 年株高、茎粗无显著差异,而 2018 年株高、茎粗及茎长差异显著;低水处理受水分限制,2 a 产量较传统畦灌平均降低 9.49%,中水处理产量与传统畦灌相比增产效应最大,2 a 平均增长 15.65%,可见滴灌复种方式下地膜覆盖在降低水分消耗的同时还可以提高西兰花产量,但过量灌水会导致西兰花减产。

2.2 膜下滴灌小麦复种西兰花的水肥利用效率

干旱区覆膜滴灌是减少土壤蒸发、提高水分利用效率的关键技术^[3,10,12-13],表 3 为膜下滴灌小麦复种西兰花不同处理的耗水量及水肥利用效率,由表 3 可知,膜下滴灌小麦复种西兰花耗水量与灌水量呈正相关关系,灌水量从低水处理增加到中水处理,2 a 小麦耗水量平均增长 7.72%,灌水量从中水处理增加到高水处理,2 a 小麦耗水量平均增长 6.36%;膜下滴灌水分利用效率较传统畦灌平均增加 39.10%。复种西兰花随灌水量增加,作物耗水量呈增加趋势,但增长幅度减缓。中水处理增产效应

表 2 2017—2018 年膜下滴灌小麦复种西兰花不同处理的产量及其产量要素

Table 2 Yield and yield factors of multicropping wheat and broccoli under different treatments of film-mulching drip irrigation in 2017–2018

作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	株高/cm Plant height	穗长/cm Panicle length	穗数 Spike number	百粒重/g 100-grain weight	产量/(kg · hm ⁻²) Yield
小麦 Wheat	2017	W1	74.58b	16.10a	445c	4.40a	5637.82b
		W2	72.38b	15.32a	578a	4.72a	6036.35a
		W3	76.37a	15.69a	584a	4.78a	6404.87a
		CK	70.19c	15.50a	502b	3.96b	5367.68b
	2018	W1	74.20b	15.9a	446b	3.80b	3576.79b
		W2	74.40b	15.3a	522a	4.34a	4328.83a
		W3	76.40a	15.7a	541a	4.21a	4532.27a
		CK	72.00b	14.9a	434b	4.12ab	3665.17b
作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/cm Stem diameter	茎长/cm Grass height	花球直径/cm Diameter of primary head	产量/(kg · hm ⁻²) Yield
西兰花 Broccoli	2017	T1	47.00b	4.05b	22.12ab	9.40d	12028.24c
		T2	50.80a	4.68a	22.88a	14.70a	16191.34a
		T3	47.90b	4.20b	21.60b	12.75b	15729.19a
		T0	47.80b	4.20b	22.50a	10.05c	13542.75b
	2018	T1	48.05b	4.86b	26.00b	9.02d	12168.65d
		T2	49.40b	4.94b	26.80ab	11.16a	14746.68a
		T3	51.30a	5.13a	27.73a	10.44b	14227.79b
		T4	49.08b	4.28c	26.13b	9.84c	13197.60c

注:同列不同字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$),下同。

Note: Different letters within the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$), the same below.

表 3 膜下滴灌小麦复种西兰花不同处理的耗水量及水分利用效率

Table 3 Water consumption and water use efficiency of multicropping wheat and broccoli under different treatments of film-mulching drip irrigation

作物 Crop	年份 Year	处理 Treatment	耗水量 Water consumption /mm	水分利用效率 Water use efficiency /(kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity
小麦 Wheat	2017	W ₁	357.19d	15.78 a	11.75c
		W ₂	394.98c	15.08a	12.58b
		W ₃	415.18b	15.43a	13.34a
		CK	464.80a	11.55b	7.95d
	2018	W ₁	355.09d	10.07b	7.45c
		W ₂	372.34c	11.63a	9.02b
		W ₃	400.86b	11.37a	9.44a
		CK	479.45a	7.64c	5.43d
西兰花 Broccoli	2017	T ₁	178.87c	67.25b	22.91c
		T ₂	226.05b	71.63a	30.84a
		T ₃	229.55b	68.52b	29.96a
		T ₀	257.23a	52.65c	25.80b
	2018	T ₁	185.94d	65.44b	23.18d
		T ₂	206.07c	71.56a	28.09a
		T ₃	251.76b	51.51c	27.10b
		T ₀	265.60a	49.69d	25.14c

最大,较传统畦灌产量平均增长 15.65%,水分利用效率和氮肥偏生产力较传统畦灌平均增加 40.03%和 15.65%。相同灌水量条件下,膜下滴灌复种西兰花较传统畦灌耗水量平均降低 7.99%。膜下滴灌西兰花水分利用效率较传统畦灌增加 30.56%,滴灌条

件下,随灌水量增加,中水处理水分利用效率比低水处理平均增长 7.93%,高水处理水分利用效率比中水处理降低 12.68%。

氮肥偏生产力受灌水量和灌水方式影响明显^[15-17],膜下滴灌较传统畦灌节肥 28.89%,同时2 a膜下滴灌小麦氮肥偏生产力较传统畦灌平均提高 58.48%。膜下滴灌复种西兰花氮肥偏生产力随灌水量增加呈先增大后降低,较传统畦灌平均增加6.04%,中水处理氮肥偏生产力最大,较传统畦灌2 a平均增长 15.65%;相同灌水条件下,膜下滴灌西兰花高水处理较传统畦灌氮肥偏生产力增长 11.98%,表明膜下滴灌有利于提高西兰花对肥料的利用效率,但灌水量过大时易造成氮素淋溶,转化为产量效益不明显,因此适宜的灌水定额,可增加西兰花产量,提高氮肥偏生产力。

2.3 膜下滴灌小麦复种西兰花的养分消耗利用

水分对 0~40 cm 土层的氮素含量影响显著,而对 40~100 cm 土层的氮素含量无显著影响^[14],因此本试验仅对 0~40 cm 土层 N 肥、P 肥消耗量进行分析。表 4 为 2017—2018 年膜下滴灌小麦复种西兰花不同灌水处理养分含量的测定结果。在施肥量相同的情况下,不同灌水处理 P 肥消耗量基本无显著差异,而 N 肥消耗量差异显著,从低水到中水2 a土壤 N 肥消耗量分别增加 4.62%和 6.49%,从中水

表 4 膜下滴灌小麦复种西兰花不同处理的养分含量

Table 4 Nutrient content of multicropping wheat and broccoli under different treatments of film-mulching drip irrigation											
作物 Crop	土层深度 Soil depth /cm	年份 Year	处理 Treatment	种植前平均土壤养分含量 Average soil nutrient content before planting/(kg·hm ⁻²)		施入养分总量 Total nutrient of fertilizer application/(kg·hm ⁻²)		收获后平均土壤养分 Average soil nutrient content after harvest/(kg·hm ⁻²)		养分消耗总量 Total nutrient consumption /(kg·hm ⁻²)	
				N	P	N	P	N	P	N	P
小麦-西兰花 Wheat-broccoli	0~40	2017	W ₁ -T ₁	95.06	48.1	1005		144.72	11.83	955.34	786.27
			W ₂ -T ₂					100.63	13.57	999.43	784.53
			W ₃ -T ₃	139.77		1200	750	91.67	15.83	1008.39	782.27
			CK-T ₀		28.89			104.25	11.48	1235.52	767.41
	0~40	2018	W ₁ -T ₁	98.38	27.18	1005		184.21	29.27	919.17	747.91
			W ₂ -T ₂					124.57	23.34	978.81	753.84
			W ₃ -T ₃	122.14	31.62	1200	750	149.55	29.65	953.83	747.53
			CK-T ₀					124.87	23.5	1197.27	758.12

表 5 膜下滴灌小麦复种西兰花不同处理产值与经济效益比较

Table 5 Comparison of output value and economic benefit of film-mulching drip irrigation for multicropping wheat and broccoli with different treatments													
处理 Treatment	种子 Seed	水费 Water rate	农机及用工 Agricultural machinery and labor	投入/(元·hm ⁻²) Input/(yuan·hm ⁻²)		产出/(元·hm ⁻²) Output/(yuan·hm ⁻²)				净产值 Net output value /(yuan·hm ⁻²)	增收 Increment /(yuan·hm ⁻²)	产投比 Output-input ratio	
				滴灌带 Drip tape	化肥 Chemical fertilizer	地膜 Mulching film	农药 Pesticide	小麦 Wheat	西兰花 Broccoli				小计 Subtotal
W ₁ -T ₁	7500	855	6500	900	3180	900	675	11978.99	33875.65	45854.64	25344.64	-10708.32	1.24 : 1
W ₂ -T ₂	7500	1080	6500	900	3180	900	675	13474.73	43313.23	56787.96	36052.96	8513.77	1.74 : 1
W ₃ -T ₃	7500	1275	6500	900	3180	900	675	14218.28	41939.77	56158.05	35228.05	7688.86	1.68 : 1
CK	7875	1950	6500	0	4640	0	675	11742.71	37436.49	49179.20	27539.20	0.00	1.27 : 1

到高水 2017 年土壤 N 肥消耗量增长 0.9%, 而 2018 年减小 2.55%; 可见相同的灌溉方式下, 灌水量增加, 土壤中 N 肥消耗量增加, 但灌水量对土壤 P 肥消耗无显著影响, 这和杨显梅^[15] 研究结果基本一致, 传统畦灌方式下小麦复种西兰花 2 a 土壤 0~40 cm 养分消耗量平均为 $1\,979.16\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较膜下滴灌养分消耗量 2 a 平均增加 14.01%, 其中土壤 N 肥消耗量平均增长 25.52%, 而 P 肥消耗量平均仅下降 0.52%。

2.4 膜下滴灌小麦复种西兰花的经济效益分析

对 2017—2018 年膜下滴灌小麦-西兰花复种不同处理平均投入、产出进行统计, 依据 2017—2018 年当地收购平均价格, 计算 2 a 平均效益(表 5)。由表 5 可知, 膜下滴灌处理的滴灌带、地膜投入增加, 但化肥及种子成本减小, 较传统畦灌成本平均降低 4.23%, 膜下滴灌小麦复种西兰花不同处理净产值大小依次为中水处理>高水处理>低水处理, 中水、高水处理净产值较传统畦灌分别增长 30.92%、27.92%。低水处理净产值较传统畦灌降低 7.97%。2 a 膜下滴灌小麦复种西兰花获得最大净产值的中水处理较传统畦灌增收 $8\,513.77\text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产投比为 1.74:1, 较传统畦灌提高 15.30%。综上可知, 膜下滴灌可降低成本投入, 增加产出, 提高单位面积土地产出率。

3 讨 论

在作物栽培管理中, 水和氮肥投入是影响作物生物量 and 经济产量的 2 个重要因子^[15-18], 朱倩倩等^[19] 研究发现适宜的水氮对饲料油菜单株鲜重、干重、产量、品质有显著互作优势, 水氮供应量过量或者不足, 互作优势减弱。水分亏缺时易造成小麦产量下降, 2 a 膜下滴灌低水处理小麦穗数及百粒重显著低于中水和高水处理, 随着灌水量增加, 小麦(植株、营养器官、籽粒)氮素积累量逐渐增加, 百粒重、产量提高^[15], 但本研究表明随灌水量的增加对小麦的增产效应明显减小。随灌水量增加, 膜下滴灌不同处理小麦水分利用效率及氮肥偏生产力呈增加趋势, 但中水处理与高水处理水分利用效率无显著差异, 与前人研究结果相似^[20]; 由于滴灌主要是根部灌溉, 肥料也随水直接被输送到根系的周围, 直接被作物吸收利用, 极大地减少了灌溉用水和肥料的投入, 进而提高水肥利用效率。本研究表明 2 a 膜下滴灌小麦水分利用效率较传统畦灌平均提高 39.76%, 2 a 膜下滴灌小麦氮肥偏生产力均大于传统畦灌, 平均提高 58.48%。

小麦收获后复种西兰花可以充分利用小麦收获后 2~3 个月的空闲期, 提高复种指数, 增加单位

面积产量, 提高水肥经济利用效率^[7]。张忠学等^[21] 研究发现作物收获后残留在土壤中的氮肥既可以提高土壤的氮素有效性, 又可以补充土壤氮库供后期作物吸收利用, 这样可减少氮肥在土壤中的累积, 降低氮素淋失的潜在风险。本研究表明小麦收获后, 复种西兰花产量明显高于小麦产量, 产量随灌水量呈先增加后减小趋势, 中水处理产量与传统畦灌相比增产效应最大, 2 a 平均增长 15.65%, 这与李小利等^[16] 研究结果相近。地膜覆盖条件下降水分布显著影响旱作作物的能量平衡^[12], 2018 年西兰花生长后期降水增加, 膜下滴灌条件下, 西兰花高水处理与传统灌溉株高、茎粗及茎长差异显著, 不同于 2017 年西兰花产量要素表现; 可能是由于生长后期降水增加土壤水分, 促进作物生长, 覆膜可提高土壤温度, 为西兰花提供一个良好的水热环境。水肥利用方面, 西兰花水分利用效率远远高于小麦, 同时 2017、2018 年膜下滴灌小麦复种西兰花较传统畦灌水分利用分别提高 31.31% 和 29.82%, 由于夏闲免耕地膜再利用能有效抑制蒸发, 增加作物产量, 进而提高作物水分利用效率^[18]。

4 结 论

1) 膜下滴灌有利于提高小麦产量和水分利用效率, 较传统畦灌处理平均提高 12.62% 和 39.10%, 但随灌水量增加, 作物增产效应下降、耗水量增长率出现回落现象, 膜下滴灌条件下, 高水处理小麦获得最大产量, 但与中水处理无显著差异 ($P > 0.05$)。西兰花中水处理产量增产效应最大, 较传统畦灌产量平均提高 15.65%, 水分利用效率和氮肥偏生产力平均增加 40.03% 和 15.65%。

2) 与传统畦灌相比, 膜下滴灌条件下土壤中 N 肥消耗平均减小 25.52%, 但灌水量对土壤 P 肥消耗无显著影响, 表明膜下滴灌有利于补充土壤氮库, 增加土壤肥力, 同时减小灌溉量, 土壤中剩余氮素增加。

3) 适宜的滴灌定额有利于增加作物的产量, 综合比较小麦和西兰花产量及水肥利用效率, 膜下滴灌定额 $4\,620\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理小麦复种西兰花效益最佳, 净产值较传统畦灌平均增收 $8\,513.77\text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产投比较传统畦灌提高 15.30%。

参 考 文 献:

- [1] Yang J, Mao X M, Wang K, et al. The coupled impact of plastic film mulching and deficit irrigation on soil water/heat transfer and water use efficiency of spring wheat in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201, 232-245.