

滴灌条件下青海春油菜需水需肥规律

张亚丽

(青海大学农林科学院土壤肥料研究所, 青海 西宁 810016)

摘要: 在青海省西宁市北郊二十里铺镇, 采用“3414”肥料设计和不同梯度灌水量进行大田滴灌春油菜需水需肥规律研究。结果表明, 滴灌施肥条件下, 春油菜产量达到 $2\,443.5 \sim 3\,132.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 各施肥处理比无施肥对照增产了 $0.8\% \sim 29.2\%$, 氮、磷、钾肥的肥料利用效率达到 50.9% 、 22.5% 、 56.7% 。滴灌方式水分利用率达到 $4.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 以上, 比大水漫灌提高了 $42.1\% \sim 61.4\%$ 。滴灌土壤含水量苗期 $<$ 盛花期 $<$ 角果期; $0 \sim 60\text{ cm}$ 土层土壤含水量苗期随着土层深度的增加而增加, 中后期随着土层深度的增加先上升后下降。距滴头 5 cm 土壤含水量最低值小于距滴头 15 cm 土壤含水量最低值。根据试验结果得出滴灌肥最大产量施肥量为 $\text{N } 138\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P}_2\text{O}_5\ 61.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{K}_2\text{O } 57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 最大产量可达 $3\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。设置滴灌土壤含水量下限为苗期 55% 、始花期 60% 、盛花期 65% 和角果期 55% 的水分管理具有较好的水分高效利用效果。

关键词: 青海; 滴灌施肥; 油菜; 需水需肥规律
中图分类号: S275.6; S565.4 **文献标志码:** A

Regularity investigation of water and fertilizer requirements on
spring rapeseed under drip fertigation in Qinghai

ZHANG Ya-li

(Soil and Fertilizer Institute, Academy of A&F Sciences, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: Gradient “3414” fertilizers and different irrigation amounts were applied in field experiments with drip fertilization conditions on rapeseed at Ershilipu town, Xining city, Qinghai province, to investigate rules of water and fertilizer requirements for spring rapeseed cultivation by drip fertigation technology. The results showed that rapeseed yields reached $2\,443.5 \sim 3\,132.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, which was increased by $0.8\% \sim 29.2\%$ than those with the control treatment. N, P, and K fertilizer utilization rates were 50.9% , 22.5% , and 56.7% respectively. Water utilization efficiency (WUE) reached over $4.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, which became increased by $42.1\% \sim 61.4\%$ compared with the control. It was further found that level of soil water content during growing period reached lowest at the bud stage, followed by at the blossom stage, and then at the pod stage. At the bud stage, with the increase of soil depth in $0 \sim 60\text{ cm}$ layers, the water content went up. At midterm and late stages, water content became increased first then dropped. Minimal values of soil water content at 5 cm away from the dripper were lower than those 15 cm away. In conclusions, the recommended fertilizer amounts for drip fertigation of rapeseed were N at $138\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 at $61.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and K_2O at $57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, resulting in a yield potential of $3\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. Minimal soil water contents that remained 55% (of soil saturated water content) at the bud stage, 60% at the early blossom stage, 65% at the full blossom stage, and 55% at the pod stage were suitable to get high water use efficiency in the experimental area.

Keywords: Qinghai Province; drip fertigation; rapeseed; regularity of water and fertilizer use

肥料在保障我国粮食安全中起着不可替代的支撑作用,然而化肥养分利用率低又对环境产生不良影响,因此用好肥料资源,提高肥料利用效率是关系到国家粮食安全和环境质量的重大科技问题^[1]。肥料养分功能的发挥,灌溉水是非常重要的条件,同时水分对作物生长必不可少。而目前水资源紧缺是全球面临的现实问题,农业用水因此更加受限,农业生产中传统大水漫灌的水分管理方式不仅水分利用率

收稿日期: 2014-05-10
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203012-4-5)资助
作者简介: 张亚丽(1979—),女,陕西扶风人,硕士,助研,主要从事土壤质量与环境、节水农业方面的研究。E-mail: liyaz@hotmail.com。

低下,还易造成水土流失和土壤养分淋失等不良土壤环境问题。传统的水、肥管理模式显然与资源高效利用的现实要求和现代农业发展步伐不相适应。水肥一体化技术是一项结合了农业节水与作物施肥的水肥精量调控以达到作物高效利用的综合技术,应用水肥一体化技术是现代农业发展的必然要求和战略选择^[2-3]。目前我国水肥一体化农业技术的研究和应用推广已较普遍,但整体还存在前期基础性研究工作不足等问题^[4],且水肥一体化技术因不同地区的气候、地理条件及生产力、管理水平差异而不同,因此开展属地化的水肥一体化基础研究显得十分必要。青海地处高原,生态环境脆弱,降水量少,蒸发量大,作物生长季节性缺水现象严重,大水漫灌的传统灌溉方式水资源利用率低,水、土、肥流失严重,导致农业效益不高。目前,青海高寒半干旱气候区大田作物滴灌水肥一体化技术研究鲜见报道。因此,在该区域开展滴灌条件下春油菜需水需肥规律研究,可为滴灌条件下节水灌溉施肥制度及水肥高效耦合技术模式的集成提供依据,对改善青海省农业气候性缺水,促进区域农业增效和可持续发展具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在青海省农林科学院试验园区,位于西宁市北郊莫家泉湾,E101°49′17″,N36°34′03″,海拔高度 2 310 m,气候类型属典型半干旱大陆性气候,年降雨量 413.6 mm,蒸发量 1 180.9 mm。年均气温 6.1℃,日照时数 2 660.6 h,无霜期 109 d。土壤类型为栗钙土,土壤质地为中壤,前茬作物为春小麦。播前对试验区土壤测定 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤容重、田间持水量分别为 1.45 g·cm⁻³、1.37 g·cm⁻³、1.28 g·cm⁻³,22.5%、25.5%、29.6%。对 0~20 cm 耕层土壤取样分析,pH 8.2,有机质 17.62 g·kg⁻¹,全盐 0.70 g·kg⁻¹,全 N 1.19 g·kg⁻¹,全 P 2.38 g·kg⁻¹,全 K 24.58 g·kg⁻¹,碱解 N 82.33 mg·kg⁻¹,速效 P 23.50 mg·kg⁻¹,速效 K 207.67 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料

供试作物品种为当地主栽春油菜品种“青杂 5 号”。供试肥料可溶性滴灌肥为新疆农垦科学院提供的氮、磷、钾复合滴灌肥。基肥使用磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量 13%)。

1.3 试验设计与方法

试验设肥料试验和灌溉水量试验两部分。肥料

试验采用“3414”试验设计,其试验处理组合、肥料用量等见表 1。灌溉水量设计 5 组滴灌油菜生育期灌溉土壤含水量下限,为田间持水量的百分比。设置 1 个常规大水漫灌处理作为对照,滴灌试验各处理土壤含水量下限见表 2。试验均采用随机区组排列,4 次重复。小区面积 4.2×5=21 m²,油菜行距 30 cm,株距 16 cm。施肥方法:20%磷肥作为底肥一次施入,剩余的 80%磷肥和全部氮、钾肥为滴灌复合肥,按油菜各生育期对养分需求的适当比例分别随滴灌追施。灌溉水量试验施肥量为滴灌春油菜肥料试验中 N₂P₂K₂ 处理用量,施肥方法同于肥料试验。

表 1 春油菜滴灌施肥“3414”试验方案

Table 1 Experimental design using “3414” fertilizers on spring rapeseed under drip fertigation

试验处理 Treatment	编码组合 Code integration			肥料用量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer amount		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	0	0	0
N ₀ P ₂ K ₂	0	2	2	0	52.5	52.5
N ₁ P ₂ K ₂	1	2	2	42	52.5	52.5
N ₂ P ₀ K ₂	2	0	2	84	0	52.5
N ₂ P ₁ K ₂	2	1	2	84	27.0	52.5
N ₂ P ₂ K ₂	2	2	2	84	52.5	52.5
N ₂ P ₃ K ₂	2	3	2	84	79.5	52.5
N ₂ P ₂ K ₀	2	2	0	84	52.5	0
N ₂ P ₂ K ₁	2	2	1	84	52.5	52.5
N ₂ P ₂ K ₃	2	2	3	84	52.5	79.5
N ₃ P ₂ K ₂	3	2	2	126	52.5	52.5
N ₁ P ₁ K ₂	1	1	2	42	27.0	52.5
N ₁ P ₂ K ₁	1	2	1	42	52.5	27.0
N ₂ P ₁ K ₁	2	1	1	84	27.0	27.0

表 2 节水滴灌制度试验方案

Table 2 Experimental design of irrigation system under drip fertigation conditions

处理 Treatment	灌溉土壤含水量下限/% Minimum value of irrigated soil water content			
	出苗~现蕾 Emergence to budding	现蕾~始花 Budding to blossom	开花期 Blossom	成熟期 Mature
E1B1B1M1	55	60	65	55
E2B2B2M2	60	65	70	60
E3B3B3M3	65	70	75	65
E4B4B4M4	70	75	80	70
E5B5B5M5	75	80	85	75
FI(CK)	漫灌 Flood irrigation	漫灌 Flood irrigation	漫灌 Flood irrigation	漫灌 Flood irrigation

滴灌制度试验自播种之日起,每隔 3 天测定土壤含水量,根据土壤含水量占田间持水量的百分比与各处理各时期含水量下限对比,土壤水分含量低于含水量下限的处理或小区进行灌溉,记录灌水量。土壤含水量测定土层深度即计划湿润层,出苗~苗期~现蕾期 20 cm、现蕾~始花期 40 cm,之后均为 60 cm。

在油菜生长的苗期、盛花期、角果期进行滴灌施肥和植株样品采集。记录每次灌水量。滴灌施肥 3 天后测定距滴头 5、15 cm 处 0~20、20~40、40~60 cm 三个垂直深度土层的土壤含水量,土壤含水量测定方法为烘干法。在油菜生长的各个生育期各处理随机采集 10 株油菜植株样品带回室内,烘干后分器官称重,并测定全 N、全 P、全 K 含量。试验播前和收获后测定土壤理化性状。植株、土壤样品测定方法见《土壤农化分析》^[5]。试验结果分析中使用的主要计算方法如下:

耗水量(mm) = 播前土壤蓄水量 + 生育期间自然降水量 + 灌水量 - 生育期间土壤蓄水量。本试验生育期间自然降水量取 2013 年该地区降水总量的 80%,为 331 mm。

土壤蓄水量(mm) = $0.1 \times v h$,其中 r 为土壤含水量(%), v 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), h 为土层深度(cm),0.1 为换算系数。测定土层深度为 0~20、20~40、40~60 cm,土壤蓄水量为三个层次储水量之和。播前土壤蓄水量测定为 159 mm。

产量水平水分利用率(WUE) = Y/ETa ,单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$, Y 为籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), ETa 为油菜生育期间实际耗水量(mm)^[6-7]。

肥料利用率(%) = (施肥处理养分吸收量 - 未施肥处理养分吸收量)/施肥量 $\times 100$

养分吸收量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 籽粒养分含量(%) + 秸秆产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 秸秆养分含量(%)

肥料农学效率 = 籽粒产量(kg)/施肥量(kg)
数据结果利用 Excel、DPS 软件进行统计分析。

1.4 水肥一体化设施及方法

试验灌溉水源为西宁北川灌区农业灌溉用水,采用蓄水池动力泵加压输水,蓄水池沉淀、筛网式过滤器过滤保证滴灌用水水质。输水管网采用三级管网,即主干管、支管和滴灌带,主干管、支管采用硬聚氯乙烯管材和管件。在油菜播种后出苗前铺设滴灌带,每 2 行油菜共用一条滴灌带。滴灌带滴孔为单翼迷宫式,额定工作压力为 50~150 kPa,滴灌孔流量为 $1.0 \sim 3.0 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。水肥混合装置采用体积为 30

L 聚乙烯施肥罐。每个施肥处理小区配备一个施肥罐,安装一个水表,以保证每小区单独灌水定额、施肥的要求。施肥罐的进、出口由 2 根细管分别与灌溉系统的支管连接。支管与 2 条 PE 三极管接点之间各设置 1 个截止阀以产生一较小的压力差,使一部分水从施肥罐进水管达罐底,肥料溶液由出水管进入灌溉系统,将肥料带入作物根区。该试验为人工操作的手动控制系统,主管和支管及与每个小区的连接处配备截止阀和水表以控制和记录每个小区的灌溉水量。

2 结果与分析

2.1 春油菜滴灌条件下需肥规律研究

2.1.1 滴灌施肥条件下春油菜干物质积累 在滴灌施肥条件下,春油菜干物质积累量随着生育期的推进不断上升,为产量的形成奠定了基础(图 1)。各生育期干物质积累量无施肥对照处理 1(N0P0K0)较施肥处理(N2P2K2)低,盛花期后这种趋势更加明显,说明在滴灌条件下,油菜干物质积累与施肥关系密切。

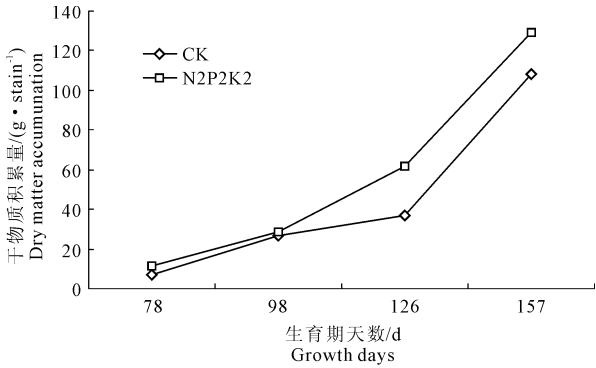


图 1 滴灌施肥条件下春油菜干物质积累随生育期变化
Fig.1 Effects of drip fertigation on dry matter accumulation during the whole growth period of rapeseed

2.1.2 不同滴灌施肥处理对春油菜产量的影响 由产量结果(表 3)可知,滴灌施肥条件下,春油菜产量各施肥处理间存在显著差异。春油菜产量在 $2424 \sim 3132 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,各施肥处理比无施肥对照增产了 0.8%~29.2%。其中 N2P2K2 处理产量和增产率最高,与 CK、N0P2K2、N1P2K1 处理差异显著,但与其他处理差异未达显著水平,其余处理相对于该处理的相对产量为 83.4%~95.4%;且 N1P2K2、N1P1K2、N3P2K2 与 N2P2K2 处理间差异不显著。缺 N 素相对产量为 78%,缺 P 素相对产量为 90%,缺 K 素相对产量为 93%。由此可见,该试验滴灌条件下肥料用量及配比对春油菜产量有很大影响。氮肥用

量对产量的影响较大,磷、钾肥与氮肥存在一定的交互作用而对产量产生影响。

表 3 滴灌施肥“3414”试验产量

Table 3 Effects of drip fertigation on rapeseed yields			
处理 Treatment	平均产量 Mean yield /(kg·hm ⁻²)	比 CK 增产 Increase /%	相对产量 Comparative percent/%
N0P0K0(CK)	2424.0b	—	77.4
N0P2K2	2443.5b	0.8	78.0
N1P2K2	2611.5ab	7.7	83.4
N2P0K2	2812.5ab	16.0	89.8
N2P1K2	2787.0ab	15.0	89.0
N2P2K2	3132.0a	29.2	100.0
N2P3K2	2845.5ab	17.4	90.9
N2P2K0	2908.5ab	20.0	92.9
N2P2K1	2802.0ab	15.6	89.5
N2P2K3	2988.0ab	23.3	95.4
N3P2K2	2964.0ab	22.3	94.6
N1P1K2	2653.5ab	9.5	84.7
N1P2K1	2547.0b	5.1	81.3
N2P1K1	2979.0ab	22.9	95.1

注:不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different letters are significantly different at P<0.05 level. The same below.

2.1.3 滴灌条件下春油菜养分吸收规律及肥料利用率 对 N2P2K2 处理各生育期油菜植株中养分含量进行测定,结合产量,统计出油菜各生育期养分吸收量变化(图 2)。油菜对 N、P、K 养分的吸收均随着生育期的推进而逐渐增加,符合作物生长对养分需求不断增加的规律。油菜对三种养分的吸收 K>N>P,油菜对 P 素的吸收在任何时期都偏低。

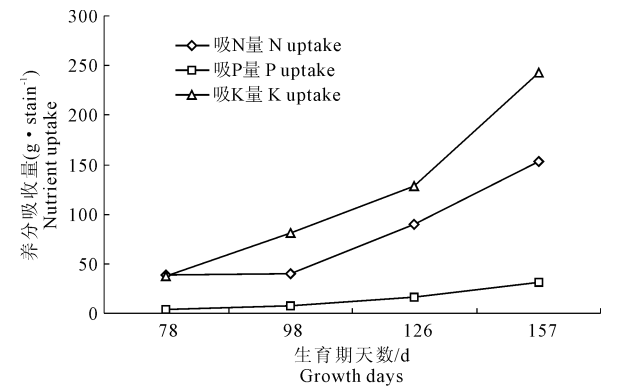


图 2 滴灌施肥条件下春油菜各生育期养分吸收量变化(N2P2K2 处理)

Fig.2 Effects of drip fertigation on nutrient uptake during the whole growth period of rapeseed(N2P2K2 treatment)
根据“3414”试验肥料用量和产量结果,拟合的三元二次肥料效应函数模型为:Y(产量)=161.5154

+13.9128N-6.8354P-6.1173K-0.4013N²-0.5547P²+0.7935K²-0.1787NP-1.5062NK+3.4003PK,R²=0.9336。方程模型推荐的最大产量施肥量为:N138kg·hm⁻²,P₂O₅61.5kg·hm⁻²,K₂O57kg·hm⁻²,最大产量可达3000kg·hm⁻²。

根据 N2P2K2、N0P2K2、N2P0K2、N2P2K0 处理的产量、养分吸收量和肥料用量等结果计算 N2P2K2 施肥处理 N、P、K 三种肥料的农学效率和肥料利用率(表 4)。滴灌肥三种肥料因子的农学效率都达到 4.0kg·kg⁻¹以上,肥料利用率达到 20% 以上,其中 N、K 素的肥料利用率均达到 50% 以上。农学效率 N>P>K,肥料利用率 K>N>P。

表 4 滴灌施肥春油菜肥料农学效率和肥料利用率

Table 4 Effects of drip fertigation on agronomic efficiencies and utilization rates of the fertilizers		
肥料因子 Fertilizer element	农学效率 Agronomic efficiency /(kg·kg ⁻¹)	肥料利用率 Fertilizer utilization rate/%
N	8.2	50.9
P	6.1	22.5
K	4.2	56.7

2.2 滴灌条件下春油菜水分利用及耗水规律

2.2.1 滴灌对土壤水分的影响 对春油菜苗期、盛花期、角果期三个灌溉施肥期地下 0~60cm 土层,距离滴头 5、15cm 土壤含水量进行测定,研究滴灌条件下土壤水分的分布规律(图 3)。苗期土壤含水量随土层深度的增加而持续上升,距滴头 15cm 处土壤含水量高于距滴头 5cm 处,不同水分处理之间随灌水量的增加土壤含水量上升。盛花期土壤含水量亦基本随土层深度的增加而上升,但出现了与整体趋势不一致之处,如个别处理土壤含水量变化趋势为随着土层深度的增加先下降后增加或 20~40cm 处增加到最大,40~60cm 处不再增加。这与盛花期数次降雨对滴灌效果的影响有关,盛花期也是该区春季苗期降雨偏少与夏季角果成熟期降雨较多的中间过渡期,因而出现一些变化。角果期土壤含水量随土层深度的增加先上升后下降,个别处理出现持续增加或先降低后上升的变化。从整体来看,土壤含水量随生育期推进而上升,整个生育期土壤含水量排序:苗期<盛花期<角果期。距滴头 5cm 土壤含水量最小值低于距滴头 15cm 土壤含水量最小值,说明滴灌土壤水分分布并非距离滴头越近水分含量越高,该结果与罗文扬等[8]的研究结论:滴灌水分进入土壤后,其移动过程和湿润体呈倒扇形体有相似之处,但与孙连宝等[9]的研究结论相反。造

成本试验该结果的原因或许因为距离滴头 15 cm 处正是油菜着生的位置,土壤水分含量较大与油菜根

系对水分的径向吸引、汇聚有关。

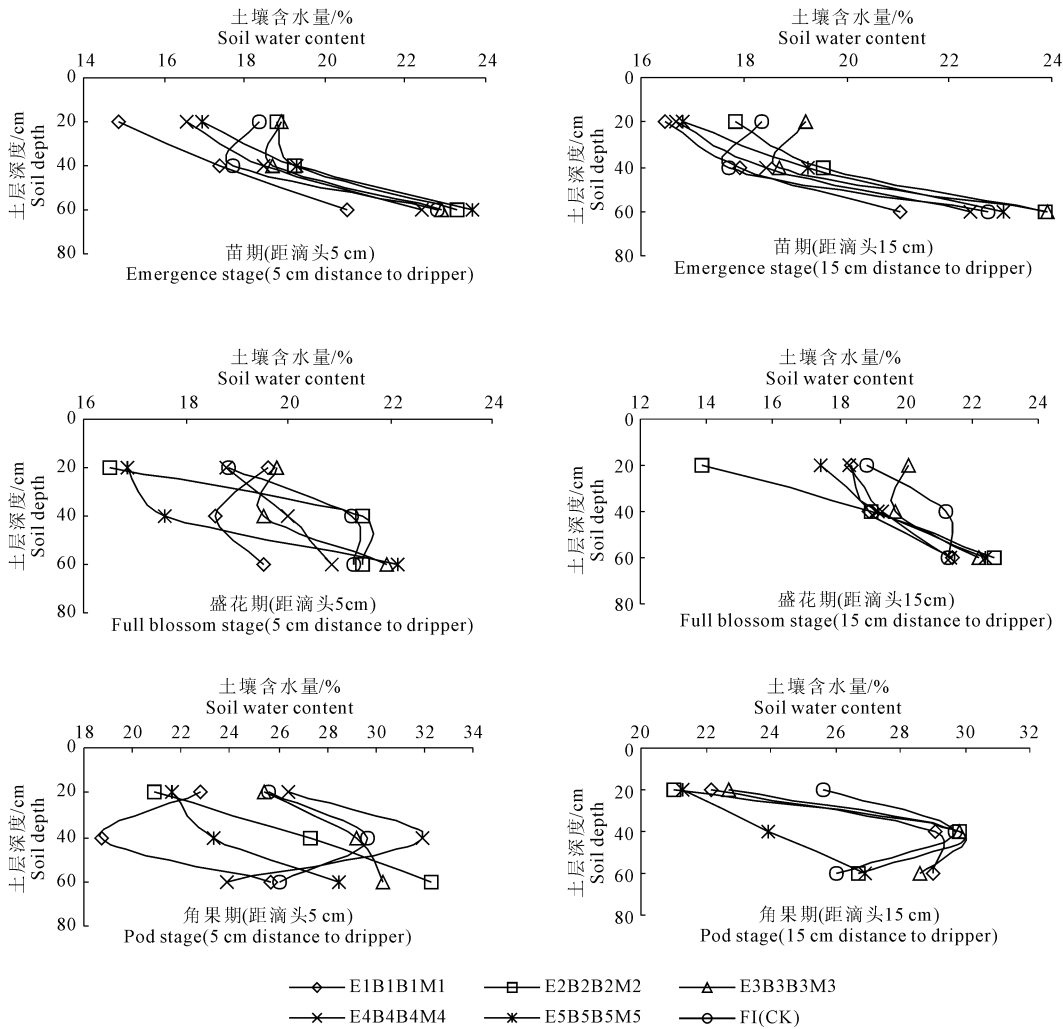


图 3 滴灌条件下春油菜各生育期土壤含水量变化

Fig.3 Effects of drip fertigation on soil water contents during the whole growth period

2.2.2.2 滴灌条件下春油菜耗水量和水分利用率
由表 5 可知,灌溉制度试验产量各处理间差异不显著,这可能与各处理施肥量相同有一定关系。但从数值上来看,各滴灌处理春油菜产量均比对照产量有所提高,且随着试验处理含水量下限要求的灌水量的增加而增加。收获后土壤蓄水量差异也不显著,生育期灌水量、耗水量和水分利用率各处理与对照差异显著。耗水量大水漫灌处理最高,达到585.3 mm,滴灌处理在 317.2 ~ 421.8 mm 之间,因而,水分利用率大水漫灌最低,为 2.91 kg·hm⁻²·mm⁻¹,其他 5 个滴灌处理的水分利用率均在 4.0 kg·hm⁻²·mm⁻¹以上,均高于漫灌处理。其中 E3B3B3M3 处理的水分利用率最高,达到 4.7 kg·hm⁻²·mm⁻¹,E4B4B4M4 处理次之,其他处理较低。以上结果说明,在滴灌灌溉方式下油菜产量随着水分供应量的

增加而增加,大水漫灌方式效率低下。滴灌方式在较大程度上提高了灌溉水的利用率。本试验滴灌含水量下限为苗期 55%、始花期 60%、盛花期 65%和角果期 55%(处理 E3B3B3M3)的滴灌方案达到了最好的水分高效利用效果。由于本试验实际操作中对于不同处理水分梯度很难做到精确控制,油菜产量及水分利用率各滴灌处理间差异不显著可能与此有关。

3 结论与讨论

在青海西宁半干旱区滴灌施肥条件下,春油菜产量达到 2443.5 ~ 3132.0 kg·hm⁻²,该产量与当地常规种植方式种植春油菜产量相比基本相当,但滴灌施肥量较常规种植施肥量低 19% ~ 48%^[10-11]。氮、磷、钾肥的肥料利用效率 50.9%、22.5%、56.7%,比当前我国主要粮食作物小麦、玉米、水稻

的氮、磷、钾肥平均利用率28.7%、13.1%、27.3%分别高出了0.77、0.72、1.1倍^[12]。说明滴灌施肥具有减少化肥投入、提高化肥利用率的效果。谭宏伟等^[13]的相关研究结果也证明了这一点。

表 5 滴灌条件下春油菜耗水量和水分利用率变化
Table 5 Effects of drip fertigation on water consumptions and water utilization efficiencies(WUE)

处理 Treatment	生育期灌水量 Irrigation amount during growth /mm	收获后土壤蓄水量 Soil water storage after harvest /mm	生育期耗水量 Water consumption during growth /mm	平均产量 Mean yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用率 WUE /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
E1B1B1M1	346.3b	177.3a	362.3b	2770a	4.20a
E2B2B2M2	374.8b	183.4a	387.0b	2832a	4.16a
E3B3B3M3	323.5b	192.8a	317.2b	2917a	4.70a
E4B4B4M4	333.7b	188.2a	356.3b	2954a	4.65a
E5B5B5M5	407.6b	175.4a	421.8b	2990a	4.14a
FI(CK)	595.2a	192.2a	585.3a	2600a	2.91b

本试验条件下,滴灌措施比大水漫灌油菜生育期总耗水量降低了27.9%~45.8%,水分利用率提高了42.1%~61.4%,具有明显的水分高效利用效果,这与聂紫瑾等^[14]的研究结论相似。试验对种植区滴灌条件下土壤水分含量和水分分布特征进行了研究,但土壤含水量及其分布受当地降雨量的变化影响较大,也受作物生长不同时期对水分的吸收利用特性的影响。

本研究提供了在高寒半干旱气候条件下青海春油菜滴灌施肥的水、肥利用效果和规律,初步证明滴灌施肥技术在该试验区条件下春油菜生产中具有稳产、节水、节肥的潜力。在试验区条件下,根据肥料用量和产量结果,拟合的肥料效应函数模型为: $Y(\text{产量}) = 161.5154 + 13.9128N - 6.8354P - 6.1173K - 0.4013N^2 - 0.5547P^2 + 0.7935K^2 - 0.1787NP - 1.5062NK + 3.4003PK, R^2 = 0.9336$ 。推荐的最大产量施肥量为: $N\ 138\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P_2O_5\ 61.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $K_2O\ 57\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,最大产量可达 $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。设置滴灌土壤含水量下限为苗期55%、始花期60%、盛花期65%和角果期55%的水分管理具有较好的水分高效利用效果。本文仅为一年的试验结果,有待进一步继续验证。

致谢:在此对项目负责人陈占全、成员刘世连、胥婷婷等及学生索南龙主对该项目研究及田间试验所做出的共同努力表示衷心地感谢!

参 考 文 献:

[1] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥科学报,2013,19(2):259-273.

[2] 王爱国.关于发展节水灌溉的方向与对策思考[J].中国水利,2011,(6):35-42.

[3] 刘俊萍,畅明琦.农业节水是现代生产力发展的要求[J].生产力研究,2007,(21):57-58,67.

[4] 尹飞虎.兵团节水农业发展思考及建议[J].兵团建设,2012,(8):30-33.

[5] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:农业出版社,2000:257-282.

[6] 黄海霞,韩国君,陈年来,等.荒漠绿洲调亏灌溉条件下辣椒耗水规律研究[J].自然资源学报,2012,27(5):747-756.

[7] 郭艳波,冯浩,吴普特.西北地区不同土壤水分处理对温室大棚番茄产量和耗水的影响[J].自然资源学报,2009,24(1):50-57.

[8] 罗文扬,王一成,习金根.滴灌条件下土壤水分运移动态研究[J].华南热带农业大学学报,2006,12(3):16-19.

[9] 孙连宝,罗金耀,李小平.流量对地下滴灌土壤水分运动的影响研究[J].节水灌溉,2012,(9):41-44.

[10] 朱春来,张荣,孙小凤,等.青海东部地区春油菜“3414”肥效试验研究[J].安徽农业科学,2009,37(26):12471-12472.

[11] 张亚丽.春油菜养分限制因子OPT试验研究[J].青海农林科技,2008,(3):6-7.

[12] 闫湘,金继运,何萍,等.提高肥料利用率技术研究进展[J].中国农业科学,2008,41(2):450-459.

[13] 谭宏伟,刘永贤,周柳强,等.基于滴灌条件下的甘蔗施肥减量技术研究[J].热带作物学报,2013,34(1):24-28.

[14] 聂紫瑾,陈源泉,张建省,等.黑龙港流域不同滴灌制度下的冬小麦产量和水分利用效率[J].作物学报,2013,39(9):1687-1692.