

覆膜方式和滴灌带布设对春玉米根区土壤水氮均匀度及根冠生长及产量的影响

周立峰¹, 蒋有源¹, 冯浩², 杨荣³

(1.昆明理工大学现代农业工程学院,昆明 650500;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000)

摘要:为探求不同覆膜方式及滴灌带布设对作物产量及收获系数的影响,设置不同滴灌带间距(A1:1 m; A2:0.5 m)与覆膜方式(M1:全覆盖;M2:半膜覆盖),通过 2 年田间试验研究其对根区土壤水氮分布均匀度(CU_w , CU_N)及春玉米根冠生长及产量的影响。结果表明:膜下滴灌条件下,根区土壤含水率与其分布均匀度具有一致性;高频滴灌施肥虽提高根区土壤 NO_3^- 含量却降低其分布均匀度,表现出不一致性。提高土壤水、氮分布均匀度未显著影响作物根长密度,但增加地上部叶面积,从而降低作物根冠面积比。相比滴灌带布设,覆膜方式对春玉米产量和收获系数的影响更为显著。低频灌溉条件下,全膜覆盖处理提高春玉米根区土壤水分和 NO_3^- 含量及均匀度,其作物产量较部分覆膜处理提高 37.4%;而高频灌溉下,部分覆膜处理的作物产量较全膜覆盖处理提高 7.7%。当根表面积与叶面积之比(RSA/LA)趋于 4 时,作物产量和收获系数最高,RSA/LA 过高或过低均会降低作物产量和收获系数。综合考虑作物产量、收获系数和滴灌带成本,低频灌溉下建议选择 A1M1 处理,高频充分灌溉条件下建议选择 A1M2 处理。

关键词:土壤水氮均匀度;膜下滴灌;根冠比;河套灌区

中图分类号:S275.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0288-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.037

The Combined Effects of Plastic Film Mulching and Lateral Layout on Soil Water and Nitrate Distribution Uniformity, Shoot-Root Growth, and Grain Yields of Mulched Drip Irrigated Spring Maize

ZHOU Lifeng¹, JIANG Youyuan¹, FENG Hao², YANG Rong³

(1.Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3.Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

Abstract: A 2-year experiment was conducted to investigate the effects of different lateral spacing and mulching methods on soil moisture, soil NO_3^- concentration, soil water spatial distribution uniformity (CU_w), soil NO_3^- spatial distribution uniformity (CU_N), shoot-root growth, grain yield, and harvest index (HI) of spring maize in Hetao Irrigation District. The experiment included two lateral spacing (A1: 1 m; A2: 0.5 m) and two mulching methods (M1: fully mulched; M2: partially mulched). Results showed that soil moisture was consistent with CU_w in root zone, however, the increased soil NO_3^- concentration did not lead to an increased CU_N under high-frequency mulched drip fertilization. The improvement of soil water (and CU_w) and NO_3^- (and CU_N) did not significantly influence crop root length (or weight) density, but it increased leaf area, and finally reduced root-shoot ratio. Compared with laterals layout, mulching methods imposed more effects on crop yield and HI. Under low-frequency irrigation condition, compared with partial mulching, full mulching increased soil moisture and NO_3^- concentration in root zone and resulted in higher crop yields and HI; however, grain yields and HI in full mulching were lower than that in partial mulching under high frequency irrigation condition. In this study, grain yields and HI were the highest when the ratio

收稿日期:2022-10-08

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060302);国家自然科学基金项目(51879224)

第一作者:周立峰(1986—),男,陕西咸阳人,讲师,博士,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:zhoulf@kust.edu.cn

通信作者:周立峰(1986—),男,陕西咸阳人,讲师,博士,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:zhoulf@kust.edu.cn

of root surface area and leaf area (RSA/LA) was equal to 4, the too high or too low RSA/LA reduced crop yield and HI. Based on high grain yield, HI, and low costs of drip taps, A1M2 was recommended under high fertigation frequency, while A1M1 was recommended under low fertigation frequency.

Keywords: soil water and nitrate distribution uniformity; mulched drip irrigation; shoot root ratio; Hetao irrigation district

膜下滴灌不仅实现土壤水肥的精准供应,还抑制土面蒸发和作物根区土壤盐分的积累,在我国干旱半干旱地区得到广泛应用。但是,有研究^[1-2]表明,膜下滴灌也可能导致作物早衰乃至减产。不良的土壤通气性^[1]、失调的根冠比^[2]以及过高的膜间干燥区土壤温度^[3]被认为是引起膜下滴灌作物早衰的主要原因。根系是作物吸收土壤水分和养分的器官,在我国新疆研究^[4]表明,膜下滴灌棉花根系基本分布在土壤湿润体内。然而,Bar-Yosef 等^[3]研究认为,滴灌能抑制膜间根系生长从而迫使根系下扎。膜下滴灌水肥的“精准供给”可能不等同于“高效供给”,而探究土壤湿润体与作物根冠生长对提高膜下滴灌作物的水肥高效利用具有重要意义。

土壤质地、灌溉频率、滴头流速、灌溉时间、滴灌带布设是影响滴灌土壤湿润体形状的主要因素^[5]。在实际膜下滴灌应用中,滴头流量通常在 1~4 L/h 之间,在此范围内滴头流量对湿润体半径与深度的影响均不明显^[5],相比而言,滴灌带间距对农田土壤湿润体影响显著^[6]。吕钊彦^[6]研究发现,春小麦农田土壤水氮分布差异随着滴灌带间距增加而增大,适当增加滴灌带间距提高小麦籽粒品质,也增大小麦产量和根系重量的行间差异;魏丽娜^[7]在黄土高原研究发现,全膜覆盖处理的根表面积、根体积与根长显著高于部分覆膜处理和不覆膜处理;Zhou 等^[8]在河套灌区研究也有类似发现,与全膜覆盖处理激发玉米气生根生长有关。

Cook 等^[9]和 Gorska 等^[10]研究发现,湿润体内 NO₃⁻在不同质地土壤中分布是不同的,而植物组织中的 NO₃⁻信号会转化为水力信号,进而对作物水肥吸收产生影响。因此,膜下滴灌过程中,根区土壤水分和 NO₃⁻的分布及其均匀度也可能对作物生产产

生影响,而如何量化根区土壤水分和 NO₃⁻分布是需要解决的问题。Kang 等^[11]将评价灌溉均匀度的克里斯琴森均匀系数(christiansen distribution uniformity, CU)用在土壤水分均匀性的评价上,取得很好的效果。河套灌区蒸降比高、表土积盐普遍,膜下滴灌广泛用于灌区经济作物(如番茄、葵花)的种植生产,具有显著的增产效果。然而,膜下滴灌对深根系作物(如小麦、玉米)产量的正、负效应均有报道^[1-2,8]。回答覆膜方式和滴灌带布设如何影响土壤水氮分布和作物根冠关系,有助于解释膜下滴灌对深根系作物产量影响的不确定性。

由于河套灌区灌溉用水限制,高含沙水滴灌近年来在灌区逐步推广应用,含沙河水长期静置会使微生物大量繁殖,导致水质恶化而难以用于滴灌^[12],因此,地表含沙水滴灌时间应尽量与灌区地表水灌溉制度保持一致。基于黄河水滴灌与地下水滴灌两种情景,拟在内蒙古河套地区设置不同膜下滴灌模式(不同滴灌带间距及覆膜方式),研究其对根区土壤水氮均匀度、玉米根冠生长及产量和收获系数的影响,旨在为该地区膜下滴灌利用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

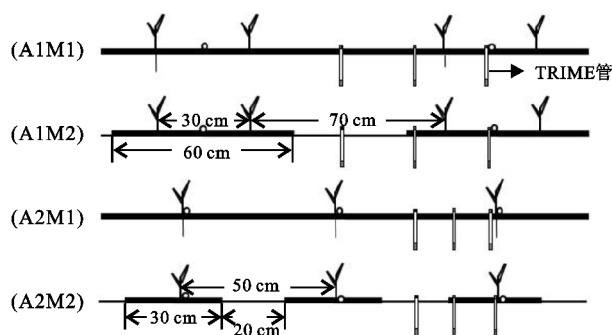
试验设在内蒙古河套灌区曙光试验站进行(107°13'32"E,40°43'16"N),海拔 1 042 m。试验地属干旱大陆性气候,多年平均降水量 135 mm,蒸发量超过 2 000 mm,年均气温 9.1 ℃。试验地降水集中在 6—9 月,无霜期 135~150 天,年日照时间 3 100~3 300 h。试验于 2016—2017 年进行,2 年春玉米全生育期平均气温分别为 19.53,20.22 ℃,总降水量分别为 122.8,38.6 mm,蒸发量分别为 896.7,962.3 mm。试验地土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤(0—120 cm)基本理化性质

土层 深度/cm	容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水量/%	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ / (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	土壤粒径/%		
							黏粒	粉粒	砂粒
0—20	1.4	29.4	0.3	7.3	7.9	8.0	20.0	47.8	32.2
20—40	1.4	31.9	0.3	6.7	5.7	13.8	23.0	53.8	23.2
40—60	1.4	30.8	0.3	6.3	3.5	5.4	23.1	47.2	29.7
60—90	1.5	17.5	0.2	3.0	1.4	3.1	2.0	3.7	94.3
90—120	1.4	31.3	0.3	5.3	3.8	6.2	15.3	35.4	49.3

1.2 试验设计与方法

供试作物为春玉米。试验设 2 个滴灌带间距 (A1:1 m; A2:0.5 m), 2 个覆膜水平 (M1:全覆盖; M2:部分覆盖) 共 4 个处理, 每个处理设 3 个重复 (图 1), 小区面积 4 m×12 m。A1 处理采用宽窄行种植, 滴灌带位于 2 行玉米中间, 为“一管双行”控制; A2 处理采用等行种植, 为“一管单行”控制。部分覆盖处理中, “一管双行”与“一管单行”的地膜宽度分别为 60, 30 cm, 地膜覆盖度均为 0.6。各小区装水表、压力计以控制灌水量及滴头流量, 试验所用贴片式滴灌带 (Φ=16 mm) 由北京绿源公司生产, 滴头间距 30 cm, 设计滴头流量 1.4 L/h。



注: 粗状黑线条代表覆膜区域。

图 1 试验处理示意

2016 年为节水低频灌溉制度, 灌溉量为 180 mm, 依照当地畦灌灌溉量 (300 mm) 的 60% 确定, 其中, 苗期灌水 1 次 (20 mm), 拔节期灌水 3 次 (共 72 mm), 抽雄期灌水 2 次 (共 48 mm), 灌浆期灌水 3 次 (共 40 mm)。2017 年在作物耗水关键期 (拔节、灌浆期) 采取高频充分灌溉模式, 全生育期灌溉量为 346.1 mm, 在 5 月 17 日与 6 月 20 日各灌水 1 次, 灌水量均为 36 mm, 自拔节期开始参考 20 cm 直径蒸发皿 ($E_{20 \text{ pan}}$) 的 3 天累积蒸发量确定灌水量^[8], 每 3 天灌水 1 次。2 年的施肥水平均为氮肥 (N) 300 kg/hm² 和磷肥 (P_2O_5) 200 kg/hm²。N (尿素, 磷酸氢二铵) 以底肥的形式全部施入土壤。N (尿素, 磷酸氢二铵) 按照 75 kg/hm² 的水平分别于播种前施入 (合计 150 kg/hm²), 其余 N (尿素) 于玉米 6 叶期后随灌水多次施入。

小区分别于 2016 年 4 月 22 日, 2017 年 4 月 26 日覆膜, 覆膜 2 天后播种。供试春玉米品种为“西蒙 6 号”。播种方式为人工点播, 播种深度为 5 cm, 播种密度为 66 600 株/hm²。作物生长期不间进行除草以消除其对土壤水分的吸收。

1.3 取样与测定方法

1.3.1 土壤含水率的测定 2016 年, 土壤含水率测定在灌水前 1 天及后 3 天进行。2017 年, 拔节期前, 土壤含水率测定时间与 2016 年一致; 拔节期后进行 3 天 1 次的高频灌溉, 土壤含水率每 2 周测定 1 次。

土壤含水率利用 TRIME-PICO TDR 进行测定, 测定深度为 1 m, 每隔 10 cm 进行取样。土壤水分探管分别埋设在滴头处、相邻滴灌带距离间 1/4 处以及 1/2 处 (图 1)。

1.3.2 土壤硝态氮的测定 土壤硝态氮采用 KCl 浸提, AAC 型流动分析仪法测定。取样点与土壤水分保持一致。风干土过筛后经 KCl (5 g 风干土, 50 mL KCl) 浸提、过滤后使用 AA3 型连续流动分析仪进行测定。

1.3.3 根重密度 (RWD)、根长密度 (RLD) 的测定 根系取样采用剖面取根法。水平方向上, “一管双行” 处理窄行与宽行分别取样至距滴灌带 15 cm 与 30 cm 处; “一管单行” 处理取样至距滴灌带 30 cm 处。水平方向上, 宽行取样间隔均为 10 cm, 窄行距作物间隔为 10, 5 cm。40 cm 之上和之下取样间隔分别为 10, 20 cm, 直到无根出现为止。土块取好后放入网袋中冲洗, 冲洗干净的根经过扫描后 (EPSON Perfection V700) 使用 WinRHIZOPro 软件进行分析, 最终得到 RLD。扫描后的根装入信封后于 75 °C 烘干至恒重。

1.3.4 叶面积指数 (LAI) 的测定 生育期内每 15 天左右用量测法观测作物的叶面积, 作物单个叶片面积计算方法为:

$$\text{玉米叶片叶面积} = \text{长} \times \text{宽} \times 0.70 \quad (1)$$

每个小区自 3 叶期后定株, 从定株的玉米中随机选取 3 株用于 LAI 的测定。单株玉米总叶面积与其对应的地面面积 (0.15 m²) 之比即为 LAI。

1.3.5 产量、生物量及收获系数的测定 蜡熟期后, 选取各小区第 3 及第 5 行玉米进行测产。随机选择 20 个果穗记录每穗粒数, 脱粒后称量籽粒鲜质量, 计算百粒质量。产量与百粒重依照称取重量的 15% 扣除水分。干物质量于 6 叶期和乳熟期各测定 1 次, 植株装入纸档案袋后放入烘箱于 105 °C 杀青 0.5 h, 最后于 75 °C 烘至恒重。收获系数 (harvest index, HI) 指籽粒产量占整个地上生物量的比例, 由籽粒产量 (kg/hm²) 除以地上部总干物质量 (kg/hm²) 获得。

1.3.6 灌水利用效率、氮肥偏生产力的计算 灌水利用效率 (kg/m³) 与氮肥偏生产力 (g/g) 分别用籽粒产量除以灌溉量 (mm) 与总施 N 量 (kg N) 得到。

1.4 计算与数据分析

采用克里斯琴森均匀度系数 (christiansen distribution uniformity, CU) 描述土壤水分 (CU_w) 及 NO_3^- (CU_N) 的均匀度^[11]。

$$CU_w = 1 - \frac{\Delta\theta}{\bar{\theta}} \quad (2)$$

$$\Delta\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N |\theta_i - \bar{\theta}|}{N} \quad (3)$$

式中: CU_w 为土壤水分的分布均匀度(%); θ 为剖面的平均体积含水率(cm^3/cm^3); θ_i 为第*i*点的体积含水率(cm^3/cm^3); N 为剖面取样点的总数。

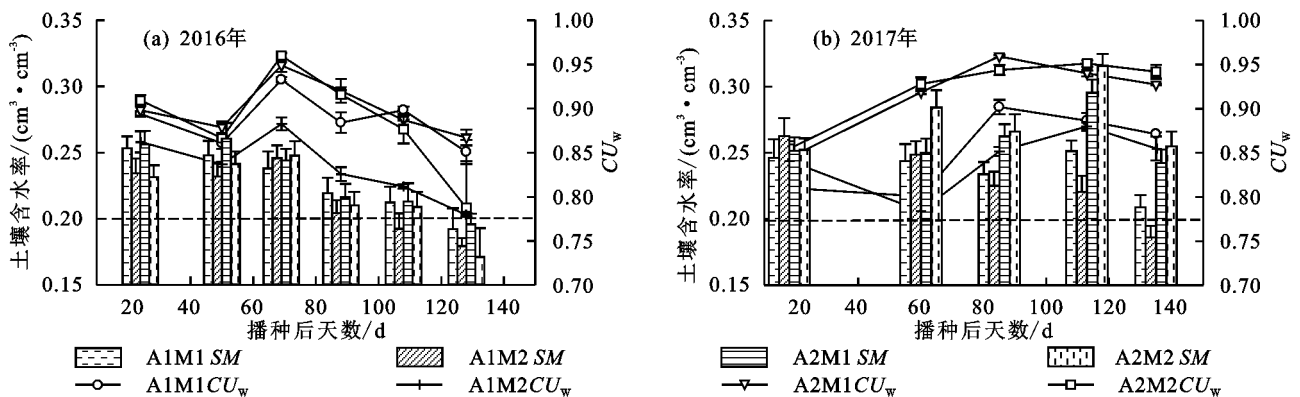
利用 LSD 法对 4 个处理进行单因素分析和多重比较, $p < 0.05$ 则视为存在明显差异。分析工具为 SPSS 15.0 软件。

2 结果与分析

2.1 根区土壤水分和 NO_3^- 含量及均匀度

2.1.1 土壤含水率及土壤水分均匀度 低频灌溉下(2016 年),各处理根区平均土壤含水率在作物生育期逐渐减少,特别是自春玉米吐丝期之后(播种后 80 天),全膜处理的根区平均土壤含水率较部分覆膜处理提高 5.8%($p < 0.05$,图 2)。在灌浆期(播种后 100 天),A1M2 处理根区土壤平均含水率已低于该地区春玉米正常生长阈值。至灌浆中后期,各处理根区土壤含水率均低于该地区春玉米生长阈值。土壤水分

自拔节期之后便是影响春玉米生长的敏感因子,因此,灌溉制度在春玉米生育后期会造成明显的水分胁迫。同土壤水分类似,A1M2 根区土壤 CU_w 在各处理间始终处于最低水平,因为其膜间土壤对灌水的响应不明显,湿润体内外水分差异显著所致^[4];而 A2M2 根区土壤 CU_w 在玉米吐丝期后剧烈下降,是因为该时期叶面积指数下降和膜间土壤含水率较高导致土面蒸发强烈所致^[13]。高频灌溉下(2017 年),各处理根区土壤含水率在拔节至灌浆前期均未发生明显下降。虽然,在乳熟期停止高频灌溉而导致 A1M2 的土壤含水率低于玉米适宜生长的土壤水分阈值,但影响作物干物质转移及籽粒形成的关键因子是土壤养分,而非作物耗水^[14]。在 2017 年,“一管单行”的根区土壤 CU_w 较“一管双行”高 8.6%,处理间的差异主要产生于苗期至拔节期(播种后 20~60 天)。总体来看,低频灌溉条件下,影响根区土壤水分的主要因子是覆膜方式,而滴灌带布设则主要影响 CU_w ;高频灌溉条件下,滴灌带间距对根区土壤水分和 CU_w 均产生显著影响。



注:虚线表示该地区适宜玉米生长的土壤水分下限($0.20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)^[15]。

图2 玉米生育期根区土壤(0—60 cm)含水率(SM)及其分布均匀度(CU_w)

2.1.2 土壤 NO_3^- 含量与分布均匀度 低频灌溉条件下,各处理根区土壤 NO_3^- 浓度在整个春玉米生育期呈持续下降趋势,而全膜覆盖处理的 NO_3^- 浓度下降较部分覆膜处理更为显著(图 3)。拔节至灌浆期是春玉米吸收土壤氮素的高峰期^[14],因此,土壤 NO_3^- 在此时期消耗较多。此外,土壤 NO_3^- 活动性强,较大的单次灌水量易导致土壤 NO_3^- 运移至根区有效吸收区域以下土层,而部分覆膜处理膜间土壤 NO_3^- 随土面蒸发向上运动,从而可能减缓 NO_3^- 向深层土体的运移。从满足作物养分需求角度看,低频灌溉条件下,全膜覆盖处理的春玉米自 6 叶期至灌浆期受到持续、轻微的 NO_3^- 胁迫,可能与其较高的生物量消耗过多的土壤 NO_3^- 有关。此外,各处理土壤 NO_3^- 浓度与 CU_N 之间的变化呈现相反趋势,虽然,全膜覆盖处理土壤 NO_3^- 浓度较部分覆膜处理低 24.3%,但其 CU_N 却比部分覆膜处理提高 10.8%。

高频灌溉条件下,各处理土壤 NO_3^- 浓度在生育期均呈横向“S”形态,各处理作物均未受到氮素胁迫。值得注意的是,高频灌溉条件下,全膜覆盖和部分覆膜处理之间的土壤氮素消耗并未有显著差异。自拔节期开始,部分覆膜处理的土壤 CU_N 比全覆膜处理降低 29.5%,表明同土壤水分不同,高频灌溉并没有持续提高根区土壤 CU_N ,反而降低部分覆膜处理的土壤 CU_N ,与行间土面蒸发导致 NO_3^- 不断向行间积聚有关^[15]。

2.2 作物根冠生长

2.2.1 根重密度(root weight density, RWD)和根长密度(root length density, RLD) 滴灌带布设显著影响作物根系的横向分布,无论是高频灌溉(2016 年)或是低频灌溉(2017 年),“一管双行”处理在宽行膜下(0—10 cm)的 RWD 均值较“一管单行”处理分别降低 23.1%,45.7%(图 4, $p < 0.05$),相应的 RLD 值分别为 7.5%,25.7%($p < 0.05$)。可能是因为“一管双行”是宽

窄行种植,其根系多分布于窄行(0—10 N),相比于“一管单行”等行距种植,其根系在水平 0—10 cm 土体中分布少;而在横向 10—20,20—30 cm 土体中,“一管双行”处理与“一管单行”处理的 RWD 无显著差异($p>0.05$)。A1M2 处理的 RLD 在 2 年均表现出较高水平($p<0.05$)。覆膜方式对 RWD 无显著影响,但其可以影响 RLD,且主要表现在“一管双行”处理的宽行根系分布中。A1M1 在宽行各水平距离的 RLD 均小于部分

覆膜处理。覆膜方式对 RWD 无显著影响,但其可以影响 RLD,且主要表现在“一管双行”处理的宽行根系分布中。A1M1 在宽行各水平距离的 RLD 均小于 A1M2, A1M1 在宽行(0—30 cm)的 RLD 平均值较 A1M2 降低 16.0%。主要是因为全膜覆盖在作物生长前期耗水旺盛,导致其根区土壤含水率偏低;其次,全膜覆盖无法接受降雨且土气界面无法通气导致其行间根系生长不良^[1,16]。

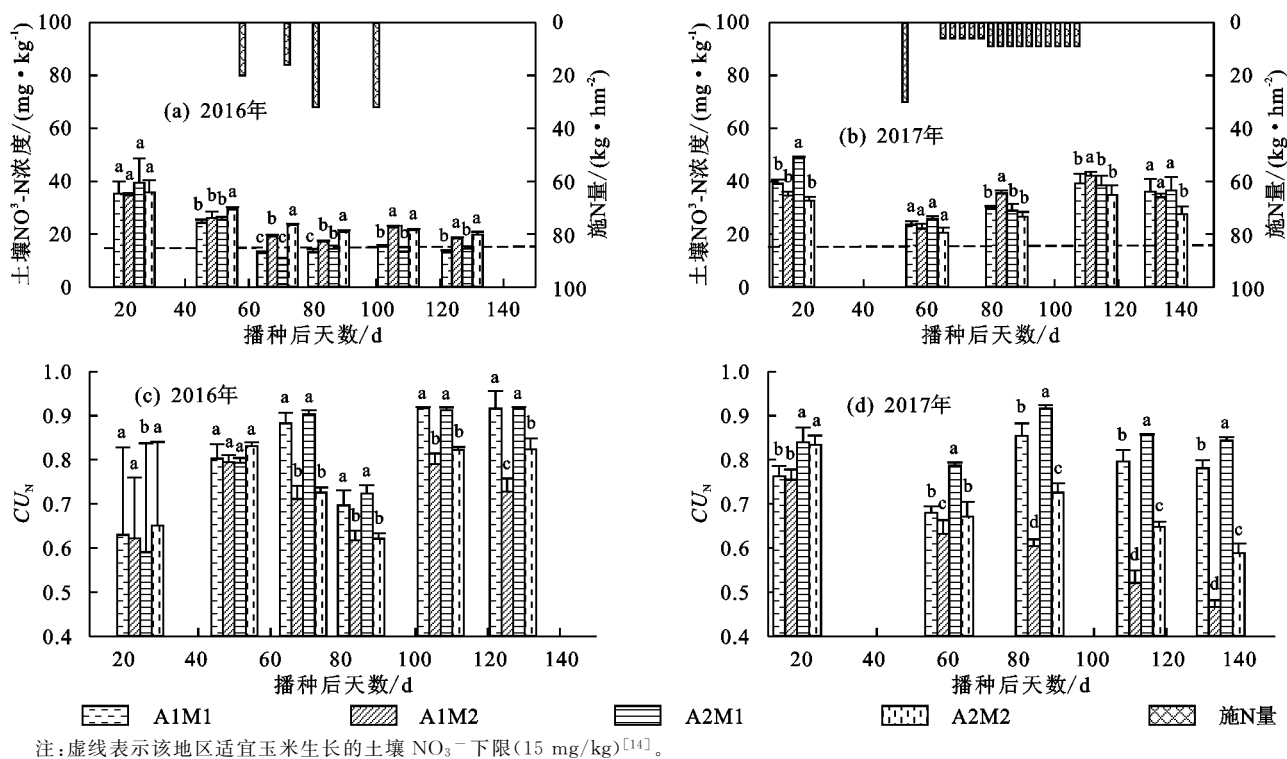
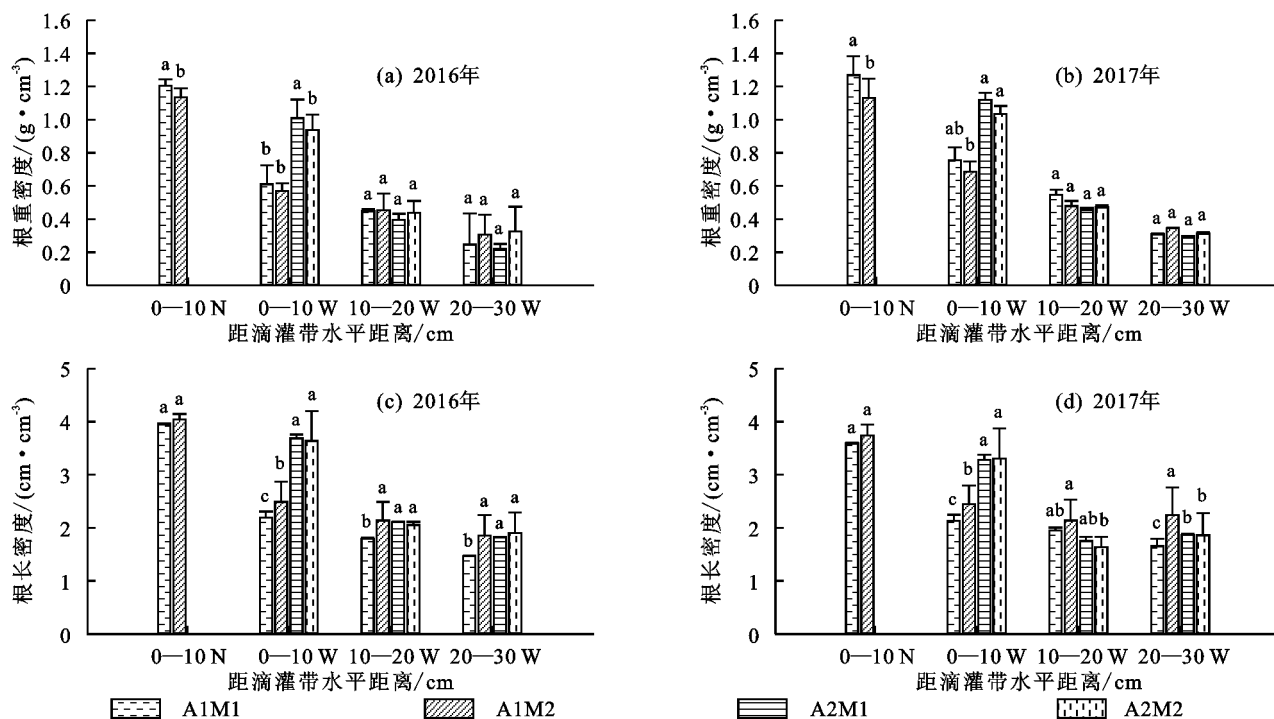


图 3 玉米生育期根区土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度和分布均匀度 (CU_N)



注:“N”代表窄行,“W”代表宽行。因“一管单行”处理(A2M1 和 A2M2)是等行种植,因此没有窄行。

图 4 春玉米乳熟期距滴灌带不同水平距离的根长密度及根重密度

2.2.2 根干物质量/叶干物质量及根表面积/叶面积
由图 5 可知,无论是高频灌溉(2016 年)或是低频灌溉(2017 年),各处理间根/叶干物质量比($W_{R/L}$)均无显著性差异($p>0.05$)。从作物根叶器官面积的角度来看,低频灌溉下,“一管双行”处理的 RSA/LA 较“一管单行”提高 15.0%($p<0.05$)。高频灌溉下,A2M1 处理的 RSA/LA 最高,A1M1 处理的 RSA/LA 最低,而 A1M2 与 A2M2 处理的 RSA/LA 居中($p<0.05$),A2M1 处理的 RSA/LA 较 A1M2 和 A1M1 分别提高 11.2%,28.9%。

2.3 产量构成及灌水和氮肥利用效率

低频灌溉下(2016 年),全膜覆盖处理的作物产量较部分覆膜处理提高 37.4%;而高频灌溉下(2017 年),部分覆膜处理作物产量较全膜覆盖处理提高 7.7%(表 2)。本研究中,滴灌带布设方式对作物产量的影响并不显著。2 年的试验数据均表明,作物收获系数与 RSA/LA 密切相关,过高(如 2016 年的 A1M1、

A1M2,2017 年的 A2M1)或过低(如 2017 年的 A1M1)的 RSA/LA 值均不利于干物质向籽粒的转移,从而导致作物收获系数较低。RSA/LA 的比值在 4 时,收获系数最高。需指出的是,低频灌溉条件下,作物的灌溉水利用效率显著高于高频灌溉,而氮肥偏利用效率则表现出相反结果。

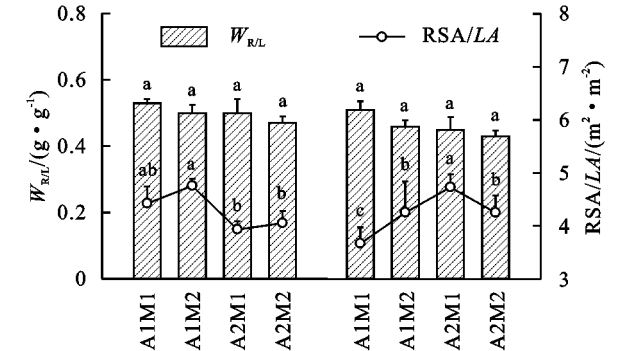


图 5 春玉米乳熟期根/叶干物质量比($W_{R/L}$)及根表面积/叶面积比(RSA/LA)

表 2 干物质量、产量、收获系数、灌溉水及氮肥偏利用效率

年份	处理	干物质量/g		产量/ (kg·hm ⁻²)	百粒质量/ g	收获系数	IWUE/ (kg·m ⁻³)	PNUE/ (g·g ⁻¹)
		6 叶期	乳熟期					
2016	A1M1	62.9a	475.6a	13948.5a	29.3b	0.43ab	7.7b	46.5a
	A1M2	44.1b	385.9b	10518.0b	27.6c	0.41b	5.9c	35.1b
	A2M1	68.5a	466.9a	14560.7a	31.2a	0.47a	8.1a	48.5a
	A2M2	35.3c	380.8b	10235.9b	27.0c	0.42b	5.7c	34.1b
2017	A1M1	86.7b	526.1a	15076.1b	29.6b	0.43b	4.4b	50.3b
	A1M2	73.5c	434.5b	16279.8a	33.6a	0.56a	4.7a	54.3a
	A2M1	103.1a	544.0a	15662.6ab	28.8b	0.43b	4.5ab	52.2ab
	A2M2	62.14d	460.1b	16823.7a	33.9a	0.55a	4.9a	56.1a

注:IWUE 为灌溉水利用效率,PFPPN 为氮肥偏利用效率;不同字母代表处理间存在显著性差异($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 根区土壤水分和 NO₃⁻ 含量及均匀度

已有研究^[17]表明,同等灌水量下,滴灌带间距加大增加湿润峰的深度,易造成土壤水分深层渗漏,与本研究 2017 年结果有所不同。在 2017 年,由于灌水频率较高,小滴灌带间距(<60 cm)容易发生湿润体的交汇^[4,6],产生零通量界面,造成类似“活塞流”形式的深层水分渗漏。低频灌溉条件下,灌水能提高根区土壤含水率和 CU_w ,与宰松梅等^[18]地下滴灌的研究结果相同。本研究进一步发现,在低频膜下灌溉条件下,地膜覆盖方式对土壤水分的影响大于滴灌带布设,而滴灌带布设主要影响根区土壤的 CU_w 。全膜覆盖条件下较高的根区土壤水分和“一管单行”条件下较高的 CU_w 是因为 A2M1 处理湿润体和行间土壤水分(即湿润比)均得到提高所致,对作物根系的横向伸展可能有正面作用^[4]。总体来说,膜下滴灌条件下,

土壤水分和 CU_w 表现出较好的一致性。2016 年施肥频率低,加肥滴灌提高根区土壤 NO_3^- 浓度,应该与本试验采用“1/4W-1/2N-1/4W”的模式进行灌水和施肥有关,即在灌水时间进行到 1/4 时加肥,持续进行到 3/4 时完成肥液的输送^[19],减弱硝态氮在湿润体边缘的积聚,使湿润体内的 NO_3^- 空间分布相对均匀^[19]。在该年度,全膜覆盖处理土壤 NO_3^- 浓度低于部分覆膜处理,与全膜覆盖处理作物干物质积累多(表 2),导致土壤氮素消耗增加有关。2017 年,在持续的滴灌施肥过程中,部分覆膜处理根区土壤 NO_3^- 的空间分布均匀度却出现显著下降,是膜间土壤水分的高强度蒸发导致 NO_3^- 土壤不断积聚所致。

3.2 玉米根冠生长及关系

无论是根长密度还是根重密度,“一管双行”种植模式作物根系在水平方向的递减速率都明显低于“一管单行”,可能是因为“一管双行”种植模式下,作物

宽、窄行 10 cm 内土体根系生长过密,迫使根系向远离主根的方向生长^[20]。因此,现有的单株作物根系分布模型方程在“一管单行”模式下可能更为适用。各处理中,A1M2 处理 CU_w 及 CU_N 均最低,特别是 CU_N ,然而其根长密度与根重密度却最大(图 4),说明膜下滴灌条件下,根区土壤水分及 NO_3^- 含量及均匀度与根系生长并无相关性。有研究^[21]表明,土壤温度与通气性^[2]对根系生长亦有影响,本研究各处理根区土壤温度差异不大且在 10~30 °C 波动,因此,土壤温度对春玉米根系生长的影响不大。全膜覆盖作物在营养生长期根系生长较好,在表层土壤形成较为发达的主根,而在乳熟期表层土壤根系的细根已经开始明显衰老^[22],导致前者虽然 RWD 大,但 RLD 小。部分覆膜处理的根系生长较好应该与土壤通气性有关。值得注意的是,根区 CU_w 及 CU_N 与根系生长虽然无相关性,但高的 CU_w 及 CU_N 却有利于冠层的生长,从而导致根冠质量比的下降。王艳哲等^[22]研究发现,根冠面积比与根区土壤氮素水平及 CU_N 呈极显著负相关关系,与本研究结果相同。是因为相对根系生长而言,充足的土壤氮素供应使植物冠层生长更加旺盛^[14],从而降低作物根冠比。

3.3 玉米产量形成及膜下滴灌模式优选

一般认为,充足的土壤水氮供应是作物获取高产的基础,与本研究低频灌溉条件下的作物产量结果一致。在低频灌溉下,A1M2 处理的玉米在拔节期遭受显著的水分和氮素胁迫,发生严重的作物早衰和减产。相比而言,A2M1 处理具有较高的根区土壤水氮含量和均匀度,因此,获得最高的作物产量。一方面,A2M1 处理较高的土壤 NO_3^- 含量与 CU_N 有利于玉米生长前期茎粗和叶面积的增加;另一方面,还延缓作物叶片衰老,延长春玉米灌浆时间并促进干物质向籽粒的转移^[8],最终通过“增源促汇”提高作物产量。本研究还发现,与低频灌溉不同,高频灌溉条件下的作物产量与根区土壤水氮条件并不相关,例如,A1M2、A2M2 处理的根区土壤水氮含量和均匀度均低于其余 2 个处理,但却获得较高的作物产量和收获系数。本研究发现,高频灌溉条件下,部分覆膜处理的作物根长密度和全膜覆盖也并无显著差异(图 4)。已有研究^[23]表明,合适的根冠质量比能提高作物产量,而本研究中,根冠面积比对产量的影响比根冠质量更为明显。当 LA/RSA 过高时,收获系数严重下降;而当

LA/RSA 过低时,根系代谢消耗更多的光合同化产物^[24],同样不利于作物产量的提高。2017 年的产量整体上高于 2016 年,且土壤 NO_3^- 浓度在春玉米生育末期下降依然较快,可能是前期高水平的土壤 NO_3^- 浓度推迟叶片衰老枯黄^[24],从而使作物更长时间地处在营养物质的吸收与转移过程中。

低频灌溉条件下,全膜覆盖显著提高作物的干物质量与产量,如 A2M1 和 A1M1 处理;高频灌溉条件下,部分覆膜处理显著提高作物产量,如 A1M2 和 A2M2。本研究中,“一管单行”处理需要布设更多的滴灌带,投入高于“一管双行”处理。因此,综合考虑作物产量和经济投入,低频灌溉条件下推荐 A1M1 处理;而高频灌溉条件下推荐 A1M2 处理。

4 结 论

膜下滴灌条件下,相比滴灌带布设,覆膜方式对春玉米产量和收获系数的影响更为显著。低频灌溉条件下,全膜覆盖处理提高春玉米根区土壤水分和 NO_3^- 的含量及均匀度,其作物产量较部分覆膜处理高 37.4%;而高频灌溉下,部分覆膜处理的作物产量较全膜覆盖处理高 7.7%。低频膜下滴灌条件下宜采用全膜覆盖方式,而高频充分膜下滴灌条件下宜采用部分覆膜方式。膜下滴灌条件下,高的土壤水分和氮素分布均匀度未显著影响春玉米根长密度与根重密度,但却增加地上部干物质量,从而降低作物根冠比。当根表面积与叶面积之比(RSA/LA)趋于 4 时,春玉米产量和收获系数最高,而 RSA/LA 过高或过低均显著降低作物产量和收获系数。综合考虑作物产量、收获系数和滴灌带成本,低频灌溉条件下,可选择 A1M1 处理,高频充分灌溉条件下,可选择 A1M2 处理。

参考文献:

- [1] 杨开静.滴灌条件下马铃薯田间土壤水、气交互效应与调控机理研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [2] 杨荣,田长彦,买文选.新疆膜下滴灌棉花早衰的根系生长发育特征[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1384-1392.
- [3] Bar-yosef B, Stemmers C, Sagir B. Growth of trickle-irrigated tomato as related to rooting volume and uptake of N and water[J].Agronomy Journal,1980,72(5):815-822.
- [4] 李东伟,李明思,周新国,等.土壤带状湿润均匀性对膜下滴灌棉花生长及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2018,34(9):130-137.
- [5] Kilic M. A new analytical method for estimating the 3D

- volumetric wetting pattern under drip irrigation system [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: e105898.
- [6] 吕钊彦.不同行管比滴灌模式对新疆春小麦产量及品质行间差异形成的影响及其生理机理[D].南京:南京农业大学,2017.
- [7] 魏丽娜.不同覆膜方式对春玉米抗倒伏特性及产量的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [8] Zhou L F, He J Q, Qi Z J, et al. Effects of lateral spacing for drip irrigation and mulching on the distributions of soil water and nitrate, maize yield, and water use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 199: 190-200.
- [9] Cook W P, Sanders D C. Fertilizer placement effects on soil nitrogen and use by drip-irrigated and plastic-mulched tomatoes[J]. *HortScience*, 1990, 25(7): 767-769.
- [10] Gorska A, Qing Y, Holbrook N M, et al. Nitrate control of root hydraulic properties in plants: Translating local information to whole plant response [J]. *Plant physiology*, 2008, 148(2): 1159-1167.
- [11] Kang S Z, Shi P, Pan Y H, et al. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas[J]. *Irrigation Science*, 2000, 19(4): 181-190.
- [12] 杜慧慧,马太玲,于健,等.引黄滴灌器堵塞环境因子的相关性分析[J]. *节水灌溉*, 2016(12): 128-130.
- [13] Pereira L S, Allen R G, Smith M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO 56: Past and future [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 147: 4-20.
- [14] 张福锁.测土配方施肥技术[M].北京:中国农业大学出版社,2011.
- [15] 马金慧,杨树青,史海滨,等.基于土壤水盐阈值的河套灌区玉米灌水制度[J]. *农业工程学报*, 2016, 30(11): 83-91.
- [16] Coelho E F, Or D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation[J]. *Plant and Soil*, 1999, 206(2): 123-136.
- [17] Bozkurt Y, Yazar A, Gençel B, et al. Optimum lateral spacing for drip-irrigated corn in the Mediterranean Region of Turkey[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1/2): 113-120.
- [18] 宰松梅,仵峰,温季,等.大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 51-57.
- [19] 李久生,杨风艳,栗岩峰.层状土壤质地对地下滴灌水氮分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19): 79-87.
- [20] 陈延玲,吴秋平,陈晓超,等.不同耐密性玉米品种的根系生长及其对种植密度的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 52-59.
- [21] Memichael B L, Ufchubch D R, Bubke J J. Soil temperature derived prediction of root density in cotton[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1996, 36(3): 303-312.
- [22] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等.水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 282-289.
- [23] 陈娟,马忠明,吕晓东,等.水氮互作对固定道垄作栽培春小麦根系生长及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1511-1520.
- [24] Gabriel A L, Savin R, Slafer G A. Maize senescence under contrasting source-sink ratios during the grain filling period[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 180: 255-265.