

低压滴灌施肥条件下温度对滴头堵塞的影响

王浩翔¹, 张新燕^{1*}, 牛文全^{1,2}, 刘敏¹, 李斌¹
(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】探究低压滴灌施肥条件下温度对滴头堵塞的影响。【方法】采用短周期间歇灌水试验方法, 考虑温度、运行压力、肥料质量浓度等因素, 展开完全随机试验, 研究滴头堵塞过程, 寻求适宜的加肥质量浓度阈值。【结果】温度越高、运行压力越大、加肥质量浓度越低滴头堵塞风险越小; 温度 40 °C 时, 运行压力 50 kPa、加肥质量浓度 3 g/L 的处理具有最高的平均相对流量、均匀度系数以及最低的堵塞率; 不同温度下加肥质量浓度阈值不同, 温度 10、20、30、40 °C 时加肥质量浓度阈值分别为 4、5、7 和 8 g/L。【结论】升高温度、提高运行压力、降低加肥质量浓度能有效降低滴头堵塞风险; 升高温度还能提高加肥质量浓度阈值及水流携带固体颗粒的能力, 但升高温度对滴头堵塞风险的降低程度随着压力的升高而减弱。

关键词: 低压滴灌; 温度; 施肥; 堵塞; 加肥阈值

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019157

王浩翔, 张新燕, 牛文全, 等. 低压滴灌施肥条件下温度对滴头堵塞的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 63-71.

WANG Haoxiang, ZHANG Xinyan, NIU Wenquan, et al. The Effect of Temperature on Emitter Clogging in Low-pressure Drip Fertilization System [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 63-71.

0 引言

滴灌施肥时, 由于滴头内部流道尺寸微小, 易被灌溉水源中的细小固体悬浮颗粒^[1-3]、肥料离子反应生成的化学沉淀^[4-5]、微生物繁殖形成的生物膜等附着^[6-7], 导致滴头堵塞。而堵塞滴头会加大滴灌带上其余滴头流量, 1%~5%的滴头发生完全堵塞会极大影响灌水均匀度, 缩短滴灌系统的使用寿命^[8]。温度的变化可导致肥料特性发生变化, 可能增加滴灌施肥时滴头的堵塞风险。

【研究意义】灌溉季节、地域、灌溉水源常导致灌溉用水水温存在差异。在太阳辐射等外界热量交换的作用下, 裸露在田间的黑色滴灌带内水温能高达 77 °C^[9], 且滴灌带首部和尾部温差可达 20 °C 以上^[10]。研究温度对滴头堵塞的影响, 对指导不同地区、不同季节的灌溉施肥模式具有重要意义。【研究进展】温度在滴灌施肥过程中对滴头堵塞的影响较为复杂, 一般认为温度升高会增加颗粒碰撞几率, 促进絮凝形成^[11], 也可以加快水中钙、镁等离子生成碳酸钙、碳酸镁等的化学沉淀, 加剧滴头堵塞程度^[12]。但温度的升

高降低了水的黏滞系数, 又能使流体的内能增加, 减弱分子间作用力导致扩散系数增大^[13], 反而能增强滴头的抗堵塞性能。刘璐等^[11]和牛文全等^[14]于冬、夏二季进行滴头抗堵塞试验, 确定了夏季易堵塞的泥沙粒径, 并发现夏季滴头抗堵塞性能高于冬季; 冬季施肥质量浓度对堵塞敏感性高于夏季。滴头的抗堵塞性能不仅与温度有关, 低压条件下(20~50 kPa)滴头流量受温度变化影响显著, 45 °C 较 20 °C 流量增幅在 16% 以上^[15], 但随着压力升至 100 kPa 乃至 200 kPa 时, 温度对滴头流量变化影响不大^[16]。施肥改变水源的温度、黏滞系数、固体颗粒质量浓度、pH 值、电导率等参数, 导致各类溶质在流道内水流紊动作用下相互碰撞、吸附、团聚、沉淀, 增大堵塞风险^[17]。【创新点】以上研究多以全溶肥液结合泥沙进行, 没有考虑肥料自身在不同水温、质量浓度等条件下的溶解特性及所携非溶物质情况对滴头堵塞的影响。因此考虑肥料自身特性, 细化温度梯度并结合运行压力、加肥浓度对滴头堵塞的影响还有待进一步研究。【拟解决的关键问题】在此背景下, 本文选择内镶贴片式滴头, 展开短周期间歇式灌水试验, 分析温度对水肥一体化滴灌滴头堵塞的影响, 探究不同温度下低压滴灌施肥的质量浓度阈值, 为不同温度下制定合适的滴灌施肥模式提供一定依据。

收稿日期: 2019-08-03

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400202)

作者简介: 王浩翔(1995-), 男, 浙江义乌人。硕士研究生, 主要从事节水灌溉研究。E-mail: wanghaoxiang702@163.com

通信作者: 张新燕(1972-), 女, 河南开封人。副教授, 博士, 主要从事节水灌溉技术与设备研究工作。E-mail: 4747168@qq.com

1 材料与方 法

1.1 试验材料与装置

试验于 2018 年 10 月 12 日—2019 年 7 月 15 日 在西北农林科技大学灌溉水力学试验大厅内进行。试验滴灌带为内镶贴片式滴灌带(杨凌秦川节水灌溉设备工程有限公 司), 额定流量 2.3 L/h, 管径 16 mm,

壁厚 0.2 mm, 滴头为齿形迷宫流道, 进水格栅数为 8, 流道宽 0.8 mm, 流道深 0.8 mm, 齿高 1.1 mm, 齿间 距 3 mm, 流道单元数 14 个, 滴头制造偏差 1.76%。 每条滴灌带长 3 m, 滴头间距 30 cm, 每条滴灌带含 10 个滴头。

试验用水为陕西杨凌示范区居民自来水, 水质情 况如表 1 所示。

表 1 试验用水水质情况

Table 1 Water quality parameters during experiment

pH 值	化学需氧量 COD/(mg·L ⁻¹)	可溶性总悬浮物 TDS/(mg·L ⁻¹)	电导率 EC/(μS·cm ⁻¹)	总氮 TN/(mg·L ⁻¹)	总磷 TP/(mg·L ⁻¹)	氨氮 NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	细菌总数 Number of bacteria/(CFU·mL ⁻¹)
7.54~7.86	1.2~2.3	106~152	217.1~372.5	8.00~9.02	0.15~0.31	0.53~0.87	<1

试验肥料为三环果蔬专用复合肥(云南云天化股 份有限公司), 总养分≥45%, N、P₂O₅、K₂O 质量比 为 15 : 5 : 25, 硫酸钾型, 高塔造粒, 常温下为白色 颗粒, 溶于水呈乳白色液体, pH 值 7.33~8.10。不同 温度下复合肥溶解度见表 2。

表 2 不同温度下复合肥溶解度

Table 2 Compound fertilizer solubility at different water temperatures

温度 Temperature/°C	10	20	30	40
溶解度 Solubility/(g·L ⁻¹)	2.6	3.0	4.6	4.8

测试平台参照 GB/T17187—2009《农业灌溉设备 滴头和滴灌管 技术规范和试验方法》^[18]、SL/T 67.1-94《微灌灌水器—滴头》^[19]以及国际抗堵塞研究 标准草案^[20]搭建而成, 如图 1 所示。平台由单相自吸 泵(扬程 60 m, 吸程 20 m, 最大流量 3 m³/h)、单相 异步搅拌泵(0.3 kW, 1 390 r/min)、压力表(上海自 动化仪表股份有限公司, 量程 0.25 MPa, 精度 0.001 MPa)、控制阀门、回流槽、120 目过滤器、电子式温 度控制器(控温精度 0.1 °C, 测控范围-9~99 °C)、 测温探头、U 型加热棒(220 V, 3 kW)以及待测试 滴灌带组成。

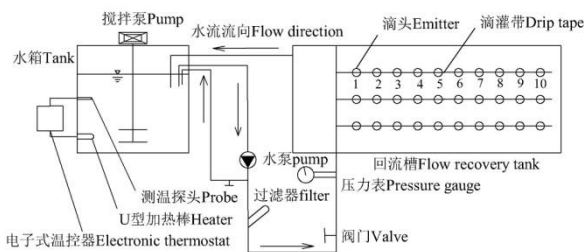


图 1 试验平台示意图

Fig.1 Test platform schematic

1.2 试验设计

为加速试验进程, 参照国际滴头抗堵塞研究标准 草案^[20], 将灌水周期等比例缩短, 灌水时间为 1 h, 每隔 2 h 灌水 1 次, 1 d 灌水 5 次, 连续 4 d, 每组处

理累计灌水 20 h。每组处理结束后, 将换下的滴灌带 置于遮阴通风处风干, 并更换新的滴灌带进行下一组 试验。试验因素水平如表 3 所示, 进行完全试验, 共 80 组, 每组处理 3 个重复。

表 3 试验处理

Table 3 Experimental treatments

因素 Factor	水平 Level				
温度 Temperature/°C	10	20	30	40	
运行压力 Pressure/kPa	20	30	40	50	
加肥质量浓度 Fertilizer concentration/(g·L ⁻¹)	3.0	4.0	5.0	7.0	8.0

1.3 测定指标与方法

采用称质量法测量滴头出流量, 滴头出流量计算 式^[20]为:

$$Q = \frac{3(m_{tw} - m_{ew})}{50T}, \quad (1)$$

式中: Q 为单个滴头流量 (L/h); T 为流量测量时间 (min); 本试验中, T 为 10 min; m_{ew} 空烧杯质量(g); m_{tw} 为 空烧杯及测试时间出流液体总质量 (g)。

每次灌水期间记录各滴头的流量, 并采用电导 率仪(HANNA HI4522-02)监测水源 pH 值、电导 率以及滴灌带首尾滴头水温动态变化情况。将滴头 从滴灌带首部至尾部编号 1~10 号。每组处理灌水 结束后统计堵塞滴头占总滴头数的百分比, 并记录 堵塞滴头编号。

1.4 评价指标与方法

平均相对流量 Dra 及克里斯琴森均匀度系数 CU 可用于评价多个滴头整体堵塞程度以及滴灌系统滴 头抗堵塞性能, 计算式^[21]为:

$$Dra = \frac{\sum_i^n \frac{q_i^t}{q_i^0}}{n} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: q_i^0 为第 i 个滴头初始流量(同温度下的清水流 量, L/h); q_i^t 为第 i 个滴头在 t 小时(即第 t 次灌水) 的出流量 (L/h); n 为单条滴灌带总滴头数。

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i^t - \bar{q}^t|}{n\bar{q}} \right), \quad (3)$$

$$\bar{q}^t = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^t}{n}, \quad (4)$$

式中： \bar{q}^t 为每条滴灌带各滴头在 t 时的平均流量(L/h)；其余参数含义同前。

微灌工程技术规范^[22]规定,当滴头流量降低 25% 时则认为滴头发生堵塞,同时规定设计灌水均匀度系

数 $CU > 85\%$ 。各处理发生堵塞的滴头数占该处理滴头总数的比值称为堵塞率。

2 结果与分析

2.1 试验参数对滴头堵塞的影响程度

从表 4 可以看出,温度、运行压力的 $P < 0.05$, 说明二者对滴头平均相对流量 Dra 的影响达显著水平,是影响滴头堵塞发生的重要因素。而加肥质量浓度、三因素之间的交互作用均未达显著水平 ($P > 0.05$),说明加肥质量浓度及三因素之间的交互作用对堵塞的影响并不明显。

表 4 试验方差分析结果

Table 4 Test result analysis of variance

方差来源 Source of variance	温度 Temperature	压力 Pressure	质量浓度 Fertilizer concentration	温度×压力 Temperature×Pressure	温度×质量浓度 Temperature×Fertilizer concentration	压力×质量浓度 Pressure×Fertilizer concentration	温度×压力×质量浓度 Temperature×Pressure×Fertilizer concentration
P 值	0.042*	0.043*	0.074 ^{ns}	0.079 ^{ns}	0.391 ^{ns}	0.279 ^{ns}	0.138 ^{ns}

注 *表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, ns 表示差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note * Indicates significant difference at $P < 0.05$ level, ns indicates no significant difference ($P > 0.05$).

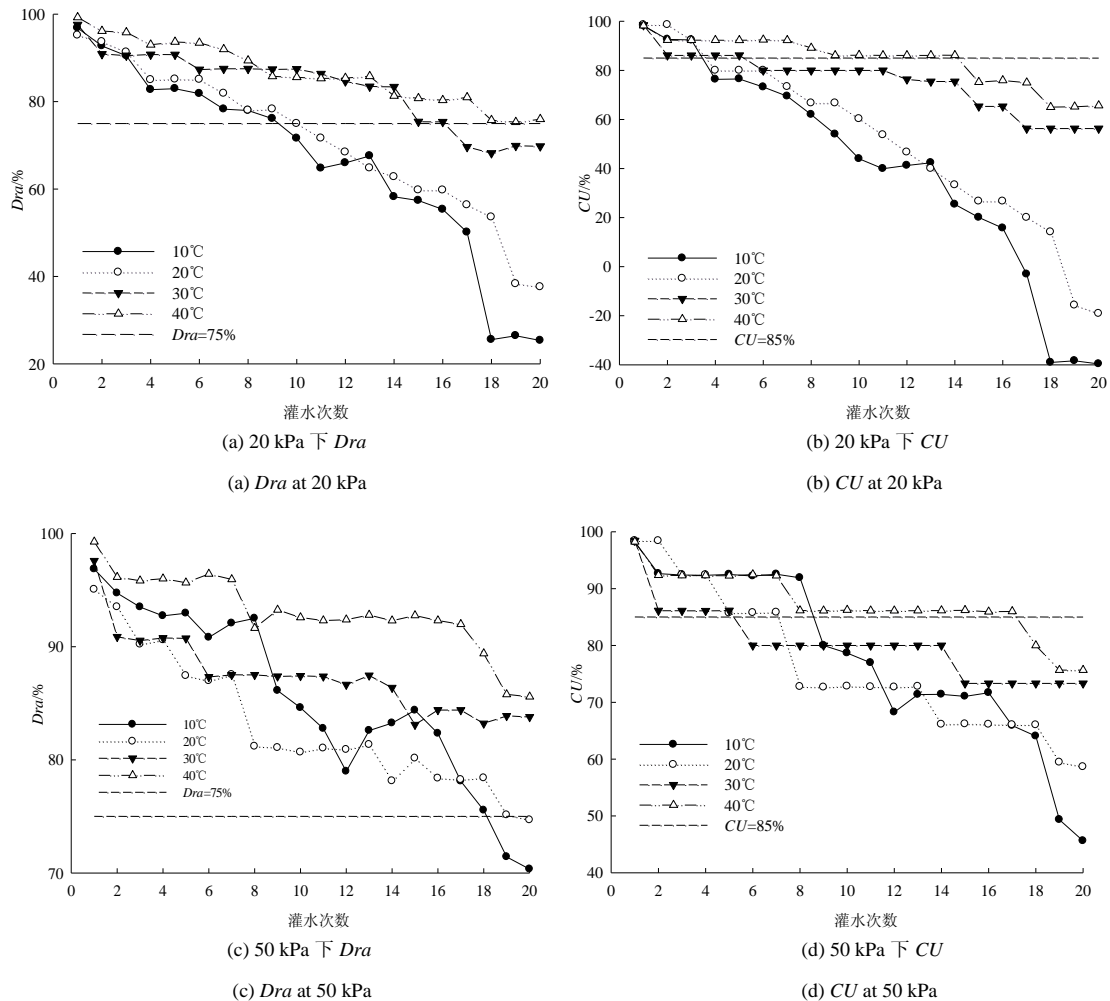


图 2 不同温度下 Dra 、 CU

Fig.2 Effect of temperature on Dra 、 CU under different temperature

2.2 温度对滴头堵塞的影响

2.2.1 温度对滴头流量及均匀度的影响

温度对平均相对流量 Dra 、均匀度系数 CU 的影响如图 2 所示。从图 2 可以发现, 20 次灌水后, Dra 、 CU 均表现为 $40\text{ }^{\circ}\text{C} > 30\text{ }^{\circ}\text{C} > 20\text{ }^{\circ}\text{C} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。比较图 2 (a)、图 2 (c) 可以发现, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理在 20 kPa 下第 11~13 次灌水 Dra 出现明显上升, 在 50 kPa 下第 12~15 次灌水 Dra 出现明显上升, 说明 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时堵塞-清洗现象明显; 而温度升高至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, Dra 的变化相对较为平稳。 CU 随灌水次数的变化过程(图 2 (b)、图 2 (d)) 也可以发现, CU 仅在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时存在回升, 其余温度条件下堵塞-清洗现象并不明显。根据 Dra 、 CU 的变化情况发现, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Dra 、 CU 降幅较大, 11~13 次灌水 Dra 回升明显; 虽然其余温度下存在 Dra 小幅回升现象, 但回升幅度控制在

5% 以内, 且 CU 变化平稳未出现回升现象。总的来说, 温度越低 Dra 、 CU 降幅越大, 升高温度可使 Dra 、 CU 降幅减小并使其变化平稳。

不同运行压力下升高温度对 Dra 、 CU 的提高程度不同。将 20 次灌水后 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下不同运行压力 Dra 、 CU 变化情况列于表 5。由表 5 可以发现, 相同灌水 20 次条件下, 温度由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 20 kPa Dra 增加 50.64%, 30 kPa 增加 39.97%, 40 kPa 增加 26.77%, 50 kPa 增加 15.24%。可以发现, 升高温度对 Dra 的提高程度随着压力的升高而减弱。 CU 也表现出与 Dra 相同的趋势。温度由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20 kPa CU 增加 105.28%, 30 kPa 增加 79.98%, 40 kPa 增加 54.32%, 50 kPa 增加 28.06%。由此得出, 升高温度对 Dra 、 CU 的提高程度随着压力的升高而减弱。

表 5 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下不同运行压力 Dra 、 CU 变化情况

Table 5 Changes of Dra and CU under different operating pressures at $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

参数 Parameter	$10\text{ }^{\circ}\text{C}$				$40\text{ }^{\circ}\text{C}$			
	20 kPa	30 kPa	40 kPa	50 kPa	20 kPa	30 kPa	40 kPa	50 kPa
$Dra/\%$	25.34	38.70	56.56	70.34	75.98	78.67	83.33	85.58
$CU/\%$	-39.61	-12.55	16.72	45.61	65.67	67.43	71.04	73.67

综上可知, 平均相对流量 Dra 、均匀度系数 CU 的降幅随温度降低而增大, 升高温度可使 Dra 、 CU 平稳变化; 但升高温度对 Dra 、 CU 的影响程度随着压力的升高而减弱。

2.2.2 温度对堵塞率及堵塞滴头分布位置的影响

温度对堵塞率及堵塞滴头分布位置的影响如表 6 所示。

表 6 不同温度下堵塞率及堵塞滴头分布位置

Table 6 Influence of temperature on clogging rate and distribution position of clogging emitter

处理 Treatments	堵塞率/% Clogging rate	堵塞滴头分布位置 Distribution position of clogging emitter
50 kPa、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	13.33	7、8、9
50 kPa、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$	16.67	6、7、8、9
50 kPa、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	23.33	6、7、8、9、10
50 kPa、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	36.67	4、5、6、7、8、9、10
20 kPa、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	23.33	5、7、8、9、10
20 kPa、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	73.33	2、3、4、5、6、7、8、9、10
30 kPa、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	26.67	6、7、8、9、10
30 kPa、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	66.67	2、3、4、5、6、7、8、9、10
40 kPa、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	20.00	7、8、9、10
40 kPa、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	46.67	4、5、6、7、8、9、10
50 kPa、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	13.33	7、8、9
50 kPa、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	36.67	4、5、6、7、8、9、10

由表 6 可见, 运行压力相同时, 温度越低堵塞率越高。50 kPa 下 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时堵塞率为 13.33%, 堵塞发生

在第 7、8、9 号滴头; $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时堵塞率为 16.67%, 第 6 号滴头发生堵塞; $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时堵塞率为 23.33%, 堵塞发生于 6~10 号滴头; 当温度降低至 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 堵塞率较 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加 23.34%, 堵塞发展至 4 号滴头。由此可知, 温度降低堵塞率明显增高。温度降低时, 肥料溶解度降低, 水中固体颗粒浓度增大, 滴头堵塞风险提高, 在水头损失的共同作用下, 堵塞随着温度的降低由滴灌带尾部向滴灌带中部乃至首部发展。

虽然升高温度可以明显降低堵塞率, 但不同运行压力下温度升高相同幅度对堵塞率的降低程度不同。温度由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 20 kPa 堵塞率降低 50%, 30 kPa 降低 40%, 40 kPa 降低 26.77%, 50 kPa 降低 23.33%。可以发现, 升高温度对堵塞率的降低幅度随运行压力的升高而减弱。

综上可知, 温度越高堵塞率越低; 升高对堵塞率的降低幅度随着压力的升高而减弱; 堵塞滴头一般分布于滴灌带尾部, 随着温度的降低, 滴灌带前端滴头逐渐发生堵塞。

2.3 运行压力对滴头堵塞的影响

2.3.1 运行压力对滴头流量及均匀度的影响

图 3 为温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同运行压力下 Dra (图 3 (a))、 CU (图 3 (b)) 随灌水次数的变化情况。由图 3 (a) 可见, 20 次灌水后, 运行压力为 20、30、40、50 kPa 时, Dra 分别降至 40%、50.52%、62.32%、75%。可知压力越小, Dra 降幅越大。且仅在 50 kPa 时 Dra 大于 75%, 其余压力均小于 75%。由图 3 (b)

可见，20次灌水后，运行压力为20、30、40、50 kPa时，*CU* 分别降至-19.11%、6.67%、33.33%、58.64%。可知压力越小，*CU* 降幅越大。20次灌水后 *CU* 在各压力下均低于 85%且在 20 kPa 甚至降至负值，灌水

均匀性最差。总的来看，灌水次数相同时，运行压力越小 *Dra*、*CU* 降幅越大；50 kPa 具有最高的 *Dra*、*CU* 且 *Dra*、*CU* 变化相对平稳。

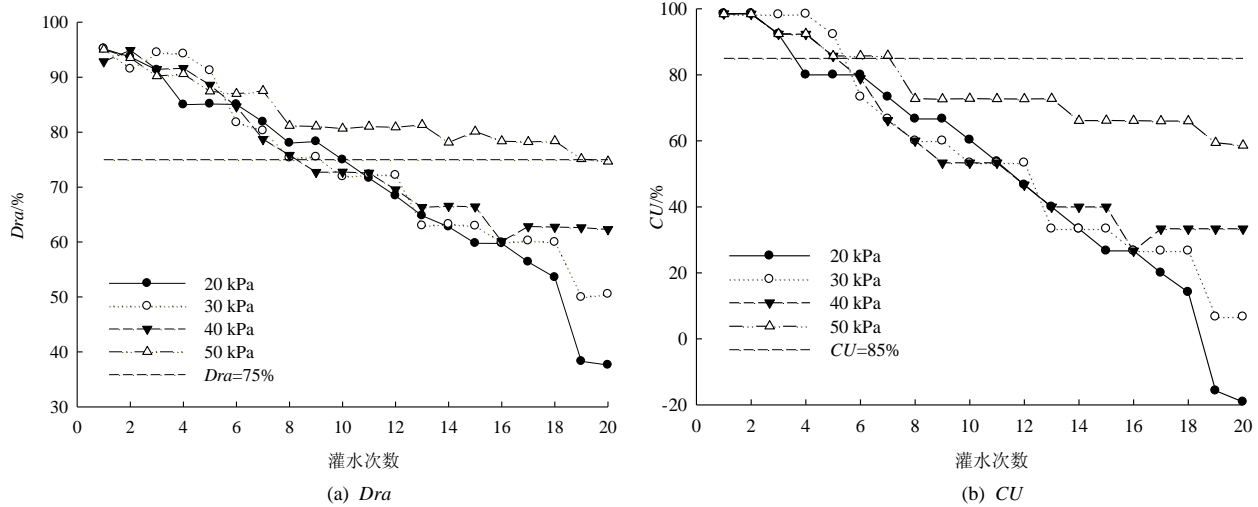


图 3 20 °C 时不同运行压力下 *Dra*、*CU*

Fig.3 Effect of operating pressure on *Dra* and *CU* at 20 °C

2.3.2 运行压力对堵塞率及堵塞滴头分布位置的影响
温度 20 °C 时不同运行压力下堵塞率及堵塞滴头分布位置列于表 7。

表 7 20 °C 时不同运行压力下堵塞率及堵塞滴头分布位置
Table 7 Effect of operating pressure at 20 °C on clogging rate and clogging dripper distribution position

处理	堵塞率/%	堵塞滴头分布位置
Treatments	Clogging rate	Distribution position of clogging emitter
50 kPa	23.33	6、7、8、9、10
40 kPa	36.67	5、6、7、8、9、10
30 kPa	46.67	5、6、7、8、9、10
20 kPa	60.00	3、4、5、6、7、8、9、10

由表 7 可知，运行压力越高堵塞率越低。50 kPa 处理堵塞率最低，堵塞滴头分布于第 6、7、8、9、10 号；压力降低至 20 kPa 时，堵塞率上升至 60%，堵塞情况最为严重并由滴灌带后半段发展至第 3 号滴头。由于水头损失的存在，滴灌带尾部流速相对首部较小，水流携带固体颗粒能力较弱，增加了固体颗粒堵塞流道的风险。运行压力的降低加上水头损失的存在使得堵塞由滴灌带尾部不断向前半段发展。总的来说，堵塞率与运行压力呈负相关；堵塞一般发生于滴灌带后半段，随运行压力的降低向滴灌带前半段发展。

2.4 加肥质量浓度对滴头堵塞的影响

2.4.1 加肥质量浓度对滴头流量及均匀度的影响

温度恒定为 20 °C 下不同加肥质量浓度 *Dra* 及 *CU* 随灌水次数的变化如图 4 所示。从图 4 (a) 可以发现，加肥质量浓度越大，*Dra* 减小越大。20 次灌水后 3 g/L、4 g/L 处理 *Dra* 均维持在 80% 以上，且 3 g/L

在 8~15 次灌水还存在有 *Dra* 升高的现象，堵塞程度较轻；而 5 g/L 则是在第 18 次灌水后减小至 75% 以下，堵塞情况较为严重。由图 4 (b) 可见，*CU* 减小幅度随加肥质量浓度增大而增大。虽然 20 次灌水后各加肥质量浓度 *CU* 均低于 85%，但 3 g/L 前 18 次灌水 *CU* 均维持在 85% 以上，第 20 次灌水 *CU* 也能维持 80%，灌水均匀性较好；4 g/L 于第 16 次灌水 *CU* 减小至 85% 以下并在 20 次灌水后维持在 75% 左右；5 g/L 灌水均匀性最差，20 次灌水后 *CU* 仅为 60% 且仅有 7 次灌水 *CU* 大于 85%。总的来说，相同灌水 20 次后，加肥质量浓度越大 *Dra*、*CU* 减小越大。3 g/L 堵塞风险较低，*Dra*、*CU* 变化相对平稳且维持最高水平。

以 20 次灌水后 *Dra* 下降超过 25% 为标准，探究不同温度下加肥质量浓度阈值的变化情况。各温度下以 3 g/L 加肥质量浓度为基础，观测 20 次灌水后 *Dra* 变化情况。若 20 次灌水后 *Dra* 下降未超过 25%，冲洗滴灌系统并更换新滴灌带，同时增加 1 g/L 加肥浓度，直至 20 次灌水后 *Dra* 下降超过 25%。若 20 次灌水后 *Dra* 下降超过 25% 则认为该加肥浓度为当前温度下的加肥质量浓度阈值。不同温度下加肥质量浓度阈值列于表 8。

由表 8 可见，温度越高，加肥质量浓度阈值越大，水中固体颗粒质量浓度也越高。随着温度由 10 °C 升高至 40 °C，肥料溶解度由 2.6 g/L 升至 4.8 g/L，加肥质量浓度阈值由 4 g/L 相应提高至 8 g/L，固体颗粒质量浓度也由 1.4 g/L 升至 3.2 g/L，说明温度的升高能提高加肥质量浓度阈值及水流携带固体颗粒的能力。温度通过增大肥料溶解度，使得加肥质量浓度阈

值得提高。温度升高，肥料溶解度增大，同一加肥质量浓度下固体颗粒质量浓度减小，固体颗粒相互碰撞形成团聚体堵塞流道的风险降低；同时由于温度升

高，流体内能增加，水流携带固体颗粒能力提高，滴头抗堵塞性能增强，加肥质量浓度阈值得以增大。

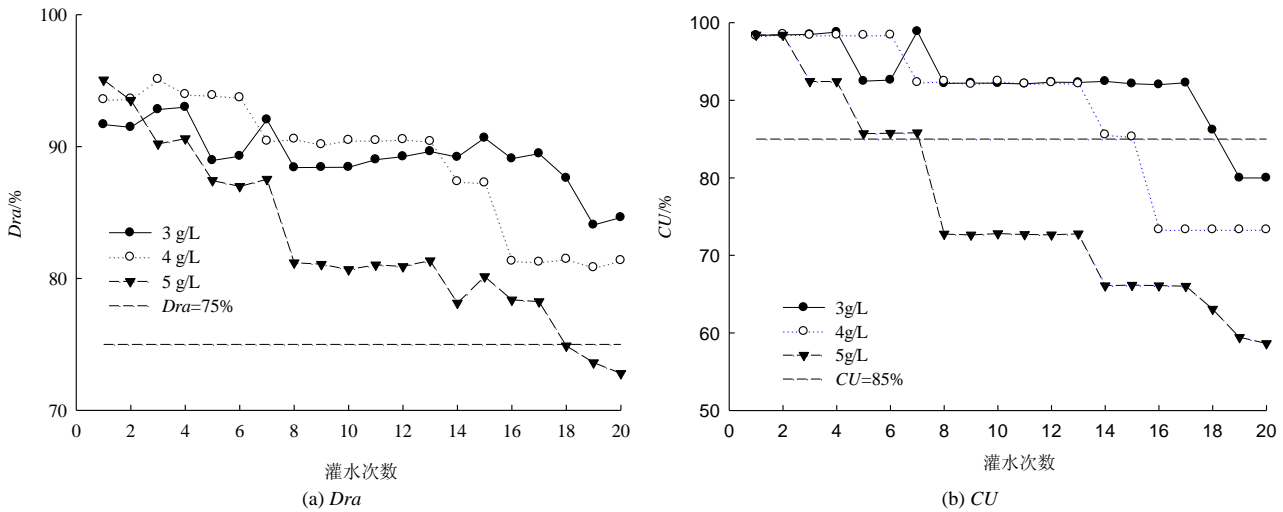


图 4 20 °C 时不同加肥质量浓度下 Dra、CU

Fig.4 Effect of fertilizer concentration on Dra and CU at 20 °C

表 8 不同温度下加肥质量浓度阈值

Table 8 Thresholds of fertilizer concentration at different temperatures

参数 Parameter	温度 Temperature/°C			
	10	20	30	40
肥料溶解度 Fertilizer solubility/ (g·L ⁻¹)	2.6	3.0	4.6	4.8
加肥质量浓度阈值 Thresholds of fertilizer concentration/ (g·L ⁻¹)	4.0	5.0	7.0	8.0
固体颗粒质量浓度 Solid particle concentration/ (g·L ⁻¹)	1.4	2.0	2.4	3.2

表 9 20 °C 时堵塞率及堵塞滴头分布位置

Table 9 Effect of fertilizer concentration at 20 °C on clogging rate and distribution position of clogging emitters

处理 Treatments	堵塞率/% Clogging rate	堵塞滴头分布位置 Distribution position of clogging emitter
3 g/L	6.67	8、9
4 g/L	16.67	8、9、10
5 g/L	23.33	6、7、8、9、10

2.4.2 加肥质量浓度对堵塞率及堵塞滴头分布位置的影响

表 9 为 20 °C 时加肥浓度对堵塞率及堵塞滴头分布位置的影响情况。加肥质量浓度越高堵塞率越高。3 g/L 处理堵塞率仅为 6.67%，仅有第 8、第 9 号滴头发生堵塞；随着加肥质量浓度增加至 5 g/L，堵塞率升至 23.33%，第 6~第 10 号滴头发生堵塞。加肥质量浓度增加时，固体颗粒碰撞形成团聚体堵塞流道的风险增加，加上水头损失的存在使得堵塞由滴灌带尾部不断向前半段发展。综上所述，堵塞率与加肥质量浓

度呈正相关；第 8、第 9 号滴头最易发生堵塞，随加肥质量浓度的增加而向滴灌带中部发展。

3 讨论

温度对滴头堵塞的影响较为复杂。温度升高黏滞系数增大^[23]，降低了水流挟带固体颗粒的能力。但同时温度的升高增加了水和固体颗粒的动能，减小颗粒间的剪切力，一定程度上破坏团聚体，增加水流挟带固体颗粒的能力^[24]。本试验研究发现，低压滴灌施肥条件下滴头堵塞程度对温度变化较为敏感。温度变化引起肥料溶解度发生较大变化，使得水源中固体颗粒质量浓度改变，进而影响滴头堵塞程度。温度升高，肥料溶解度增大，加肥质量浓度阈值提高，水流携带固体颗粒能力的增强，滴头抗堵塞性能提高；温度降低，肥料溶解度减小，固体颗粒质量浓度增加，滴头堵塞风险增大。但温度对滴头堵塞的影响随着压力的升高逐渐减弱。当压力为 20 kPa 时，升高温度对滴头堵塞风险的降低较为明显，随着压力提升至 50 kPa 时，升高温度对降低滴头堵塞风险的效果减弱，说明压力的提高使得温度的影响逐渐减弱。当压力升至 100 kPa 甚至 200 kPa 时，温度的改变对滴头流量的影响甚微^[21]。

温度一定时提高运行压力能显著降低滴头堵塞风险，而加肥质量浓度的增高则使得滴头发生堵塞的风险增大。在低压 (<50 kPa) 运行条件下，运行压力的变化主要影响流态的转换以及流道摩阻系数 *f* 的变化，转换的压力阈值在 40~45 kPa 之间^[25]。当工作压力 *P* ≤ 40 kPa 时，*f* 随 *P* 的增加而减少，该情况下流态为层流；当工作压力 *P* ≥ 45 kPa 时，摩阻系数

f 随工作压力的增加趋于稳定, 流动变为紊流, 紊流和水流剪切力的存在会使形成的固体颗粒团聚体分散破碎, 不利于形成更大的团聚体, 固体颗粒易随水流出, 故 50 kPa 处理堵塞程度较轻。本试验所用复合肥为硫酸钾型复合肥, pH 值在 7.33~8.10 之间, 属于中高堵塞范围, 易加速水中钙、镁离子形成沉淀。加肥质量浓度增大时, 水中 K^+ 和 SO_4^{2-} 离子数量在增大, 流体黏性增大, 细小的固体颗粒也在增多, 颗粒间连接力增强^[26], 易形成大的颗粒团聚体以及硫酸盐等沉淀, 加速流道内堵塞物质的形成^[23]; 当阳离子增加到一定值时, 双电层受静电引力压缩而变薄, 悬浮物絮凝强度及沉降强度显著增大^[24]。同时加肥质量浓度的增大导致不溶固体颗粒质量浓度增加, 使得固体颗粒相互碰撞几率增加, 易形成大颗粒团聚体堵塞流道^[27], 故加肥质量浓度为 3 g/L 时滴头堵塞程度较轻。

本试验研究发现, 堵塞情况最容易发生在滴灌带尾部。水头损失的存在使得滴灌带末端流速较低, 水流的脉动强度较小, 固体颗粒不易随水流经迷宫流道流出, 造成滴头堵塞。外界条件改变, 例如温度降低、运行压力的减小及加肥质量浓度的增加, 与水头损失共同作用下, 堵塞由滴灌带尾部发展至中部乃至首部。

本试验采用温控设备控制温度, 但由于环境因素滴灌带首尾存在一定的温差, 虽采取一定措施使温差控制在 4 °C 以内, 仍影响温度梯度的进一步细化设置, 试验装置和管网布置方式有待改进。试验所用复合肥在 20~30 °C 溶解度有较大提升, 针对这一温度范围, 温度的精确控制以及温度梯度的进一步细化设置有待改善。试验所用复合肥溶解度随温度变化影响较大, 故针对不同肥料的物理、化学和生物特性探究温度对滴头堵塞的影响有待进一步的深入研究。

4 结论

1) 升高温度、提高运行压力、降低加肥质量浓度能有效提高平均相对流量和均匀度系数, 降低堵塞率。此外, 升高温度还能提高加肥质量浓度阈值及水流携带固体颗粒的能力; 但升高温度对滴头堵塞风险的降低程度随运行压力的升高而减弱。

2) 滴灌带尾部的第 8、9、10 号滴头最易发生堵塞, 随温度的降低、运行压力的减小、加肥质量浓度的增加而逐渐影响滴灌带中部乃至首部。

3) 不同温度下加肥质量浓度阈值不同, 10、20、30、40 °C 下分别为 4、5、7、8 g/L。

参考文献:

[1] 李康勇, 牛文全, 张若婵, 等. 施肥对浑水灌溉滴头堵塞的加速作用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 81-90.
LI Kangyong, NIU Wenquan, ZHANG Ruochan, et al. Accelerative

effect of fertigation on emitter clogging by muddy water irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 81-90.
[2] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review [J]. Irrigation Science, 1991, 12: 187-192.
[3] ZHOU Hongxu, LI Yunkai, WANG Yan, et al. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: Dynamic variation and formation mechanism[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215: 25-43.
[4] ZHANGZHONG Lili, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Chemical clogging of emitters and evaluation of their suitability for saline water drip irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2016, 65: 439-450.
[5] HILLS D J, NAWAR F M, WALLER P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32: 1 202-1 206.
[6] ZHOU Bo, WANG Tianzhi, LI Yunkai, et al. Effects of microbial community variation on bio-clogging in drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Agricultural Water Management, 2017, 194: 139-149.
[7] SONG Peng, LI Yunkai, ZHOU Bo, et al. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 36-45.
[8] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Emitter clogging effects on trickle irrigarion uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1981: 77-80.
[9] ANONYMOUS. Drip system insuring future water for Arizona pecans[J]. Drip Irrigation Farming, 1975: 6-8.
[10] PETER Parchomchuk. Water temperature effects on emitter discharge rates[J]. Transactions of the ASAE, 1976: 690-692.
[11] 刘璐, 李康勇, 牛文全, 等. 温度对施肥滴灌系统滴头堵塞的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 98-104.
LIU Lu, Li Kangyong, NIU Wenquan, et al. Influence of Temperature on Emitter Clogging with Fertigation through Drip Irrigation System[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(2): 98-104.
[12] 刘燕芳, 吴普特, 朱德兰, 等. 滴灌条件下水的硬度对滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 95-100.
LIU Yanfang, WU Pute, ZHU Delan, et al. Effect of water hardness on emitter clogging of drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 95-100.
[13] 姜彦敏, 刘娟红, 周晓平, 等. 温度对水的粘度和扩散系数影响的研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2009, 34(6): 34-39
LOU Yanmin, LIU Juanhong, ZHOU Xiaoping, et al. Temperature on the viscosity and diffusion coefficient of water[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2009, 34(6): 34-39.
[14] 牛文全, 刘璐. 浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 39-46.
NIU Wenquan, LIU Lu. Influences of Sediment Concentration and Water Temperature of Muddy Water on Emitter Clogging[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(3): 39-46.

- [15] 徐明金, 聂境, 葛旭峰, 等. 低压条件下滴灌带的水力特性及温度影响效应试验[J]. 中国农村水利水电, 2010, 12: 8-10
XU Mingjin, NIE Jing, GE Xufeng, et al. Experiment of hydraulic trait of drip irrigation strap under low pressure and the influence of temperature on emitter discharge [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, 12: 8-10.
- [16] RODRIGUEZ-SINOBAS Leonor, LUIS Juana, ALBERTO Losada, et al. Effects of water temperature changes on emitter discharge[J]. Irrigation and Drainage Engineering, 1999, 125(2): 64-73.
- [17] 刘璐, 牛文全, 武志广, 等. 施肥滴灌加速滴头堵塞风险与诱发机制研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 228-236.
LIU Lu, NIU Wenquan, WU Zhiguang, et al. Risk and Inducing Mechanism of Acceleration Emitter Clogging with Fertigation through Drip Irrigation Systems[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(1): 228-236.
- [18] 农业灌溉设备 滴头和滴灌管 技术规范 and 试验方法. GB/T 17187—2009[S]. 2004.
Agricultural irrigation equipment-emitters and emitting pipe-specification and test methods. GB/T 17187—2009[S]. 2004.
- [19] 微灌水器——滴头. SL/T 67.1-94 [S].
Micro-irrigation emitters-drips. SL/T 67.1-94[S].
- [20] Clogging test methods for emitters. ISO/TC 23/SC 18/WG5 N12-V3[S].
- [21] LIU Zeyuan, Xiao Yang, LI Yunkai, et al. Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 174-184.
- [22] 微灌工程技术规范. GB/T 50485—2009 [S].
Technical code for microirrigation engineering. GB/T 50485—2009[S].
- [23] 官雅辉, 牛文全, 刘璐, 等. 肥料类型及浓度对水肥一体化浑水滴灌滴头输沙能力的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 78-84.
GUAN Yahui, NIU Wenquan, LIU Lu, et al. Effect of fertilizer type and concentration on sediment transport capacity of dripper in drip fertigation with muddy water[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 78-84.
- [24] 刘林, 陈立, 王家生, 等. 不同离子浓度下泥沙浓度对絮凝沉降的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(1): 29-32.
LIU Lin, CHEN Li, WANG Jiasheng, et al. Effect on the flocculation sedimentation velocity in different conditions of cation concentration by concentration of sediments particles[J]. Engineering Journal of Wuhan University(Engineering Science), 2007, 40(1): 29-32.
- [25] 闫大壮, 杨培岭, 赵桥, 等. 滴头流道内部含沙水流流动特征的试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 52-56.
YAN Dazhuang, YANG Peiling, ZHAO Qiao, et al. Experimental study on sediment flow hydraulic characteristics in dripper emitter path[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 52-56.
- [26] RANOJOY Duffadar, SURACHATE Klasin, JEFFREY M D, et al. The impact of nanoscale chemical features on micron-scale adhesion crossover from heterogeneity-dominated to mean-field behavior[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 337: 396-407.
- [27] 王文娥, 王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 1-6.
WANG Wene, WANG Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrate emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 1-6.

The Effect of Temperature on Emitter Clogging in Low-pressure Drip Fertilization System

WANG Haoxiang¹, ZHANG Xinyan^{1*}, NIU Wenquan^{1,2}, LIU Min¹, LI Bin¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservancy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: 【Background】 Drip fertigation is an effective way to concurrently replenish water and nutrients to meet the demand of crops, and precisising fertigation can improve water and fertilizer use efficiency. As the key component in drip irrigation system, the emitter is to dissipate the pressurized water ensuring that water is supplied to the root zone uniformly and steadily. However, the emitter is also susceptible to clogging due to its narrow channel through which water flows. Emitter clogging is affected by many factors and what is less understood is the role of temperature. 【Objective】 The purpose of this paper is to experimentally investigate the effects of temperature on emitter clogging in low-pressure drip fertigation system. 【Method】 Using a short-cycle intermittent irrigation test method, a completely randomized experiment considering temperature, operating pressure and fertilizer concentration was conducted to study emitter clogging in attempts to find a threshold fertilizer concentration beyond which the emitter is susceptible to clogging. 【Result】 Rising temperature and operating pressure while lowering fertilizer concentration reduced the risk of emitter clogging. When the working pressure was 50 kPa and fertilizer

concentration was 3 g/L, the dripping rate of the emitter peaked at temperature 40 °C, the clogging rate was the least and the irrigation uniformity was the highest. The threshold fertilizer concentration varied with temperature, being 4 g/L, 5 g/L, 7 g/L and 8 g/L when the temperature was 10 °C, 20 °C, 30 °C and 40 °C respectively. **【Conclusion】** Rising temperature and operating pressure, along with reducing fertilizer concentration, can effectively reduce the risk of emitter clogging. While rising temperature increased the threshold of fertilizer concentration and the ability of the water to carry solid particles, the efficacy of rising temperature in alleviating emitter clogging decreased as water pressure increased.

Key words: Low-pressure drip irrigation system; temperature; fertilization; emitter clogging; fertilizer concentration threshold.

责任编辑：陆红飞

.....
(上接第 62 页)

Effects of Drip Irrigation Schedule on Water and Salt Movement in Soil

CAO Zhenxi¹, LI Yong³, SHEN Xiaojun^{1*}, SONG Ni¹, WANG Feng¹, WANG Xingpeng³

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Open Laboratory of Crop Water Demand and Regulation, Ministry of Agriculture, Urumqi 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. School of Water Conservancy and Construction Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: **【Objective】** Salt movement and accumulation in soil is modulated by rainfall and irrigation. This paper aims to elucidate the impact of drip irrigation schedule on water and solute movement in a farmland soil. **【Method】** The experiment was conducted in a saline-alkali rooted soil, and we compared three two dripping rates (per emitter): 2.8 L/h and 5.6 L/h, and three irrigation amounts: 22.5 mm, 37.5 mm and 52.5 mm (per emitter). **【Result】** When the irrigation amount was the same, increasing dripping rate increased the radius of the wetting front, and made the moisture distribution broader and shallower and the surface soil more moist. When the dripping rate was the same, increasing irrigation amount increased both the radius of the wetting front and soil water content. Soil salinity in top 50cm soil layer increased with dripping rate and irrigation amount; the desalination radius and desalination depth were 30 cm and 60 cm respectively when the dripping rate was 2.8 L/h, and 40 cm and 40 cm respectively when the dripping rate doubled.**【Conclusion】**Our results showed that the desalination was best when dripping rate was 5.6 L/h and irrigation quota was 52.5 mm.

Key words: irrigation schedule; drip irrigation; water and salt movement; desalination

责任编辑：陆红飞