

# 微咸水滴灌条件下氮磷肥协同施入对灌水器堵塞的影响

杨晓奇<sup>1,2</sup>, 王珍<sup>2</sup>, 刘宏权<sup>1\*</sup>, 李久生<sup>2</sup>

(1.河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001;

2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048)

**摘要:**微咸水滴灌条件下水肥一体化过程可能加剧灌水器堵塞的发生。【目的】评估氮磷肥协同施入对微咸水滴灌系统灌水器堵塞的影响。【方法】以灌水器类型、灌溉水电导率和氮磷肥协同施入模式为研究对象,灌水器类型选取内镶贴片式灌水器(E1)和单翼迷宫式灌水器(E2);灌溉水质按照电导率设置3个水平,分别为2(S2)、4(S4)和6 dS/m(S6),另外设置地下水(G)(电导率约0.5 dS/m)作为对照(CK);氮磷协同施入模式设置磷酸一铵-尿素(MU)、磷酸一铵-硫酸铵(MA)、磷酸二铵-尿素(DU)、磷酸二铵-硫酸铵(DA)4种,测定了灌水器流量、灌水器堵塞物质干质量及堵塞物质成分。【结果】滴灌氮磷协同施入条件,系统运行96 h 小时内镶贴片式灌水器平均相对流量均值较单翼迷宫式灌水器高19%,内镶贴片式灌水器抗堵塞性能更好;灌水器堵塞随灌溉水电导率升高明显增加,当灌溉水电导率>4 dS/m 时,氮磷肥协同施入会导致滴灌系统的快速堵塞,磷酸盐类沉淀是主要堵塞诱因,占比超过85%;施用磷酸二铵较磷酸一铵更易造成灌水器堵塞,地下水和2 dS/m 灌溉水条件施用磷酸一铵处理灌水器堵塞物质干质量均值分别较施用磷酸二铵处理低76%和41%。【结论】施用磷酸一铵可以在一定程度上减缓灌水器堵塞。

**关键词:**滴灌;灌水器;施肥;微咸水

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019316

杨晓奇,王珍,刘宏权,等.微咸水滴灌条件下氮磷肥协同施入对灌水器堵塞的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(7): 68-76.

YANG Xiaoqi, WANG Zhen, LIU Hongquan, et al. Effect of Phosphorus and Nitrogen Fertigation on Clogging in Drip Emitters Applying Saline Water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 68-76.

## 0 引言

【研究意义】如何合理使用微咸水进行灌溉以缓解区域水资源危机、保证农业可持续发展已成为研究者关注的热点<sup>[1]</sup>。【研究进展】与常规水相比,微咸水中含有大量的盐分离子( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等),这可能会导致微咸水滴灌时灌水器内堵塞物的形成机制较常规水更为复杂<sup>[2]</sup>。化学堵塞是微咸水滴灌条件下引起灌水器堵塞的主要原因,堵塞物生成速度随灌溉水电导率的增加而增加<sup>[3-4]</sup>。上述研究为了解微咸水滴灌条件下灌水器堵塞机制及过程提供了重要基础。近年来,滴灌水肥一体化技术推广速

度呈明显加快趋势,灌溉水的离子环境因肥料的加入变得更加复杂,水肥一体化条件下灌水器堵塞过程及机制也已受到研究者关注。Bozkurt等<sup>[5]</sup>研究指出,施肥时下灌水器堵塞明显比不施肥严重,施用含有 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的肥料,灌水器堵塞更为严重;李康勇等<sup>[6]</sup>研究指出,肥料的加入会增加固体颗粒间的絮凝作用,促进团聚体堵塞物质的形成;刘璐等<sup>[7]</sup>研究指出,不同肥料诱发灌水器堵塞物质的形成机理和堵塞风险差异明显;王天志等<sup>[8]</sup>指出 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 等阳离子与磷酸盐生成难溶化合物加速了堵塞物质的形成。【创新点】以上研究为滴灌水肥一体化条件下灌水器堵塞机制的研究提供了很好的借鉴,但在微咸水水质与氮磷协同施肥对灌水器堵塞过程影响机制方面的研究尚不够深入,开展复杂灌溉水源条件下不同氮磷肥协同施入模式对灌水器堵塞影响的研究对提出高效安全的施肥模式至关重要。【拟解决的关键问题】本试验研究微咸水滴灌氮磷协同施肥对灌水器堵塞的影响及堵塞形成机理,旨在为微咸水灌溉地区降低滴灌灌

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51790531);国家重点研发计划课题(2016YFC0403103);流域水循环模拟与调控国家重点实验室自由探索课题(SK12018TS06)

作者简介: 杨晓奇(1994-),男,硕士研究生,主要从事灌溉原理及技术研究。E-mail: 1326114865@qq.com

通信作者: 刘宏权(1979-),男,副教授,主要从事水土资源高效利用方面研究。E-mail: 50081999@qq.com

水器堵塞风险提供一定技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 滴灌带

本试验选取内镶贴片式灌水器（E1）和单翼迷宫式灌水器（E2），0.1 MPa 压力下的标称流量分别为 2.0 和 1.8 L/h。试验开始前，按照 ASAE 标准 S553<sup>[9]</sup>测定灌水器流量-压力关系和制造偏差（*CVm*，%），并计算灌水器流量系数 *k* 和流态指数 *x*。根据 ASAE 标准 EP405.1<sup>[10]</sup>，E1 和 E2 灌水器 *CVm* 值分别为 3% 和 4%，制造质量属于“优”。试验用灌水器参数见表 1。

### 1.2 试验设计

试验在国家节水灌溉北京工程技术研究中心大

兴试验基地进行。灌溉水质按照电导率设置 3 个水平，分别为 2、4 和 6 dS/m，另外设置地下水（电导率约 0.5 dS/m）作为对照。其中，地下水取自试验站自备井。参照我国西北地区典型微咸水质情况<sup>[11]</sup>，在试验基地地下水基础上添加 3：1.3：1.3：1 摩尔配比的 NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaHCO<sub>3</sub> 和 CaCl<sub>2</sub> 混合物配置微咸水，不同电导率微咸水盐分混合物添加量预先通过室内试验确定。氮磷协同施入模式设置磷酸一铵-尿素（MU）、磷酸一铵-硫酸铵（MA）、磷酸二铵-尿素（DU）、磷酸二铵-硫酸铵（DA）4 种，参照我国北方几种典型大田作物氮磷肥施用方案<sup>[12]</sup>，所有模式氮肥和磷肥混合比例均设置为 1：1。试验共计 32 个处理，各处理编号对应试验因素水平如表 2 所示。

表 1 试验用灌水器参数

| Table 1 Characteristics of the emitters used in the experiments |         |                                                |                          |                                    |          |          |               |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------|----------|---------------|
| 编号灌水器<br>Emitter                                                | 类型 Type | 标称流量/(L·h <sup>-1</sup> )<br>Nominal discharge | 间距/cm<br>Emitter spacing | 长×深×宽<br>Length × depth × width/mm | <i>k</i> | <i>x</i> | <i>CVm</i> /% |
| E1                                                              | 内镶贴片    | 2.0                                            | 30                       | 23×0.7×0.7                         | 6.77     | 0.57     | 3             |
| E2                                                              | 单翼迷宫    | 1.8                                            | 30                       | 300×0.7×0.7                        | 7.50     | 0.68     | 4             |

表 2 试验处理设计

Table 2 Summary of the experimental design

| 施肥模式<br>Fertigation practices | 内镶贴片式灌水器 Plain channel emitter (E1) |          |          |          | 单翼迷宫式灌水器 Labyrinth emitter (E2) |          |          |          |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------|----------|----------|---------------------------------|----------|----------|----------|
|                               | 地下水 Groundwater                     | 2 dS/m   | 4 dS/m   | 6 dS/m   | 地下水 Groundwater                 | 2 dS/m   | 4 dS/m   | 6 dS/m   |
| MU                            | E1-MU-G                             | E1-MU-S2 | E1-MU-S4 | E1-MU-S6 | E2-MU-G                         | E2-MU-S2 | E2-MU-S4 | E2-MU-S6 |
| MA                            | E1-MA-G                             | E1-MA-S2 | E1-MA-S4 | E1-MA-S6 | E2-MA-G                         | E2-MA-S2 | E2-MA-S4 | E2-MA-S6 |
| DU                            | E1-DU-G                             | E1-DU-S2 | E1-DU-S4 | E1-DU-S6 | E2-DU-G                         | E2-DU-S2 | E2-DU-S4 | E2-DU-S6 |
| DA                            | E1-DA-G                             | E1-DA-S2 | E1-DA-S4 | E1-DA-S6 | E2-DA-G                         | E2-DA-S2 | E2-DA-S4 | E2-DA-S6 |

### 1.3 试验装置及运行方式

为避免降雨的影响，试验在遮雨棚内进行。每个水质设置 1 个独立供水系统，每个系统设置 4 个独立支管系统进行 4 种施肥模式试验，供水系统布置见图 1。每个供水系统配置水箱（300 L）、加压泵（额定流量 3 m<sup>3</sup>/h，扬程 20 m）、2 级过滤器（叠片式过滤器 120 目+网式过滤器 120 目）、压力表（量程 0.4 MPa，0.4%）。每个施肥模式均进行 2 种滴灌带测试，每种滴灌带设置 3 根长度 10 m 的毛管作为重复。所有滴灌带通过干管、分干管和支管连接，每个支管控制 1 种施肥模式。将与支管连接好的毛管固定在高度差为 15 cm 的 2 层框架上，每层安装 12 条毛管，滴灌带安装坡度为 0。在下层滴灌带下方 20 cm 处沿滴灌带方向安装 12 根 PVC 集水槽并设置一定坡度，集水槽安装位置与上方滴灌带位置基本对应，使其上方对应的上下 2 层各 1 根毛管上灌水器流出水通过集水槽回流到水箱内，形成循环水系统。集水槽同时用来放置

测试灌水器流量的承水桶。参照滴灌常规水施肥过程，设置 3 d 为 1 个灌水-施肥周期。每个周期前 2 天系统运行 8 h（08:00—16:00），通过调节各支管上阀门控制毛管工作压力为 0.1 MPa；第 3 天按设计的 4 种模式依次进行施肥（通过支管阀门开闭控制），施肥过程时长 2 h，采用“1/4-1/2-1/4”的模式进行施肥<sup>[13]</sup>，即前 0.5 h 先进行灌水，之后向水箱中投加氮磷肥，使氮磷肥质量浓度均为 0.5%，并运行系统 1 h，最后更换水箱中肥料溶液为新配置灌溉水并运行 0.5 h（该部分水作为下一周期正常运行用水）。试验于 2018 年 9 月 17 日—11 月 16 日进行。试验期间，当灌水器平均相对流量（*Dra*）低于 25% 时认定系统完全堵塞，停止运行，因此对于灌溉水质为 2、4 和 6 dS/m 处理，灌水-施肥周期数分别为 10、6 和 6 个；因试验后期水温较低，地下水处理在第 13 次施肥后停止试验，系统累计运行时间最长为 208 h。整个试验期内，未对滴灌带进行冲洗。

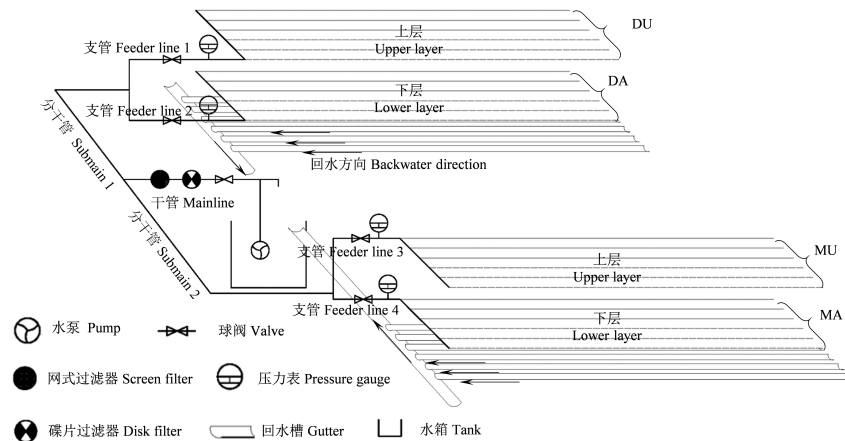


图 1 试验供水系统示意图

Fig.1 Schematic of the water supply system

## 1.4 指标测定

### 1.4.1 水质监测

试验中，每 2 周收集 1 次地下水样，并测量水质指标。试验过程中使用电导率仪（sensION5, HACH, Loveland, 美国）在每天的 08:00、12:00 和 16:00 监测灌溉水温 and 电导率（EC）。在施肥过程中，利用 pH 计（PHB-4, 雷磁，上海，中国）测定肥液 pH 值。

### 1.4.2 灌水器流量测定

在每个灌水-施肥周期后进行灌水器流量测定。每条滴灌带等间距选取 17 个灌水器并进行标记，测点间距为 60 cm，确保每次流量测定选择的灌水器相同。测试时，每个灌水器下方放置承水桶，每次流量测定时间为 10 min，使用精确度为 0.1 g 的电子秤（SP4001, Ohaus, NJ, US）对承水桶收集的水逐一进行称量。选择灌水器平均相对流量（ $Dra$ , %）作为评价灌水器堵塞的指标<sup>[14]</sup>，计算式为：

$$Dra = 100 \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n q_{new}}, \quad (1)$$

式中： $q_i$  为第  $i$  个灌水器流量（L/h）； $\overline{q_{new}}$  为灌水器是全新时的平均流量（L/h）； $n$  为测试的灌水器数量， $n=17$ 。

### 1.4.3 灌水器堵塞物质测试

试验结束后每个处理选取 1 条滴灌带并沿滴灌带方向在首部、中部和尾部各选择 2 个灌水器，利用称质量法测定灌水器内部堵塞物质干质量（ $DW$ ）<sup>[15]</sup>。分别在滴灌带首部、中部和尾部采集灌水器堵塞物质研磨混合均匀，用 X 射线衍射仪（D8 AVANCE, Bruker, Karlsruhe, 德国）分析灌水器堵塞物质矿物组分。

## 1.5 数据分析

所有数据均采用 SPSS 22.0 软件（IBM, New York,

美国）进行统计测试。利用 3 因素方差分析检验灌水器类型、灌溉水电导率和氮磷肥协同施入模式是否对  $Dra$  产生显著或极显著影响（ $\alpha=0.05$  或  $\alpha=0.01$ ），利用新复极差法（Duncan）进行多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质

表 3 给出了地下水水质指标监测结果。假定施肥过程中（1 h）各肥料组成离子不与其他离子发生反应，计算得到微咸水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度、全盐量（TDS）和硬度。根据 Nakayama 等<sup>[2]</sup>给出的判别标准，地下水对堵塞的危害程度为轻微—中等，而微咸水为中等—严重。

系统运行过程中各灌溉水水温和电导率变化如图 2 所示。从图 2 可知，试验期间，灌溉水温随气温降低呈逐渐降低趋势，最高和最低水温分别为 26.9、11.8 °C，各灌溉水质处理差异不明显。地下水的电导率变幅为 0.40~0.61 dS/m，微咸水的电导率与设计值稍有差异，试验期间的 4 种灌溉水质 EC 均值分别为 0.53、2.12、4.05 和 5.89 dS/m。因灌溉水电导率对不同施肥模式处理肥料溶液 pH 值无明显影响，图 3 给出了相同施肥处理、不同灌溉水质条件下肥料溶液 pH 均值。由图 3 可知，施肥模式对肥液 pH 值影响明显，磷酸一铵-尿素（MU）和磷酸一铵-硫酸铵（MA）处理肥液 pH 值明显低于磷酸二铵-尿素（DU）和磷酸二铵-硫酸铵（DA）处理，MU、MA、DU 和 DA 不同处理各次施肥肥料溶液 pH 均值依次为 MA（5.96） $\approx$  MU（6.00） $<$  DA（7.71） $\approx$  DU（7.78），由此可知磷肥类型是造成不同施肥模式处理肥液 pH 值差异的主要因素；在相同磷肥类型情况下，施入尿素处理肥液 pH 值略高于硫酸铵处理，这与尿素水溶液呈弱碱性有关。

表 3 灌溉水水质参数

Table 3 Water quality parameters

| 指标 Index                                             | 地下水 Groundwater                          |               | 2 dS/m    |               | 4 dS/m    |               | 6 dS/m    |               |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
|                                                      | 参数                                       | 危害程度          | 参数        | 危害程度          | 参数        | 危害程度          | 参数        | 危害程度          |
|                                                      | Parameter                                | Hazard rating | Parameter | Hazard rating | Parameter | Hazard rating | Parameter | Hazard rating |
| TN/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 1.32±0.03                                | /             | —         | /             | —         | /             | —         | /             |
| TP/(mg·L <sup>-1</sup> )                             | 0.05±0.01                                | /             | —         | /             | —         | /             | —         | /             |
| TSS/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 32.8±2.6                                 | /             | —         | /             | —         | /             | —         | /             |
| TDS/(mg·L <sup>-1</sup> )                            | 287±13                                   | 轻微            | 944       | 中等            | 2655      | 严重            | 4365      | 严重            |
| Ca <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 28.9±2.0                                 | /             | 93.1      | /             | 209.5     | /             | 325.9     | /             |
| Mg <sup>2+</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )              | 33.5±1.7                                 | /             | —         | /             | —         | /             | —         | /             |
| 硬度 Hardness/(mg·L <sup>-1</sup> )                    | 210±2                                    | 中等            | 370       | 严重            | 661       | 严重            | 952       | 严重            |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 11.9±0.5                                 | /             | —         | /             | —         | /             | —         | /             |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 216.0±14.0                               | /             | 346.5     | /             | 583.2     | /             | 819.9     | /             |
| Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )               | 17.2±1.1                                 | /             | 302.1     | /             | 818.6     | /             | 1335.1    | /             |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> ) | 22.7±2.1                                 | /             | 228.1     | /             | 600.6     | /             | 973.1     | /             |
| pH 值                                                 | 7.61±0.03                                | 中等            | 7.63      | 中等            | 7.66      | 中等            | 7.69      | 中等            |
| 细菌总数 Total bacteria count/(CFU·mL <sup>-1</sup> )    | 4.2×10 <sup>3</sup> ±1.3×10 <sup>3</sup> | 轻微            | —         | /             | —         | /             | —         | /             |

注 危害程度按 Nakayama 等<sup>[2]</sup>给出的标准分级；/表示未纳入评价；—表示未进行测定或计算。

Note Hazard Classification according to Nakayama and Bucks's standard<sup>[2]</sup>; / represents not included in the evaluation; —represents not measured or calculated.

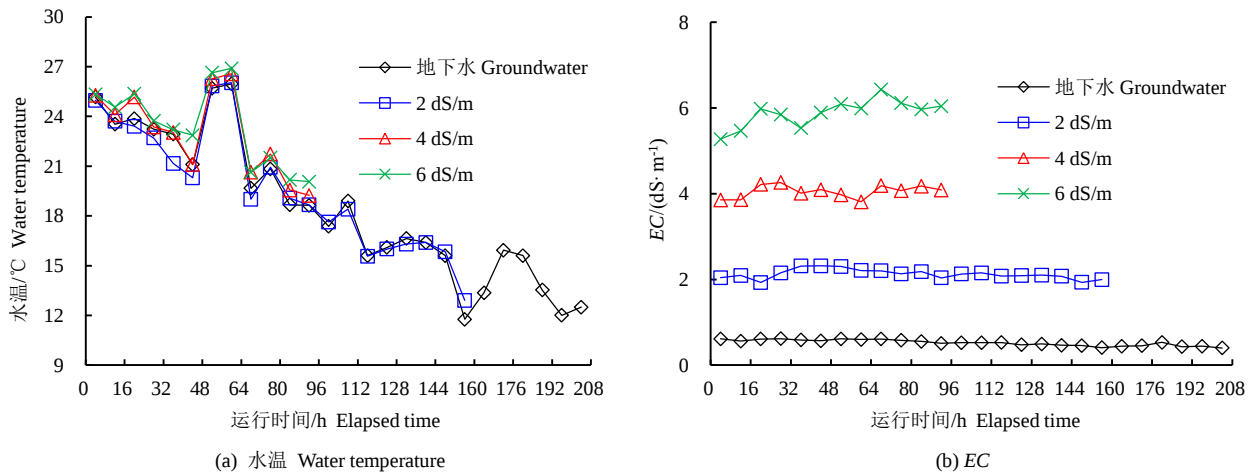


图 2 灌溉水水温 and 电导率变化

Fig.2 Variation of water temperature and electrical conductivity

## 2.2 灌水器平均相对流量 ( $Dra$ )

各处理不同运行历时  $Dra$  方差分析结果见表 4。由表 4 可知，系统运行过程中，水质、施肥模式和灌水器类型均显著影响灌水器堵塞过程的发生 ( $\alpha=0.05$ )，水质和施肥模式对灌水器堵塞的影响大于灌水器类型。不同处理灌水器平均相对流量动态变化见图 4 和 5。由图 4 和图 5 可知，内镶贴片式灌水器较单翼迷宫式灌水器表现出较强的抗堵塞性能。在整个运行过程中，内镶贴片式灌水器的  $Dra$  下降速度低于单翼迷宫式灌水器。例如，在系统运行至 96 h (6 次施肥) 时，内镶贴片式灌水器所有

处理  $Dra$  均值 (40%) 较单翼迷宫式灌水器对应值 (34%) 高 19%，这与单翼迷宫式灌水器较长的流道长度有关 (表 1)。

对比不同灌溉水质处理灌水器  $Dra$  变化情况可知，地下水灌溉处理灌水器  $Dra$  下降速度明显较低，微咸水灌溉处理灌水器  $Dra$  下降速度随灌溉水电导率的升高而增大。在整个试验期内，地下水处理 2 种灌水器  $Dra$  随时间下降速率基本恒定。对于 S2 处理，系统运行初期灌水器  $Dra$  下降速度较低，但是当施肥次数超过 3 次后，灌水器堵塞程度增加明显 (图 4(b))，这说明灌水器一旦有部分堵塞发生，堵塞将加剧；对

于 S4 和 S6 处理, 自灌水施肥开始, 灌水器 *Dra* 即以较大的速度下降, 这说明灌溉水盐分离子量较高时, 氮磷肥协同施入会导致灌水器堵塞风险明显增加。

对于地下水 和 S2 处理, 施肥组合对灌水器 *Dra* 变化影响明显。其中, 磷酸一铵-尿素 (MU) 和磷酸一铵-硫酸铵 (MA) 处理 *Dra* 下降速率明显低于磷酸二铵-尿素 (DU) 和磷酸二铵-硫酸铵 (DA) 处理。例如, 系统运行 48 h 时, 灌水器 *Dra* 均值依次为 MA-S2 (91%) > MU-S2 (83%) > DA-S2 (76%) > DU-S2 (61%), MU 和 MA 处理较低的堵塞风险与这 2 个处理较低的肥料溶液 pH 值 (图 3) 有关。

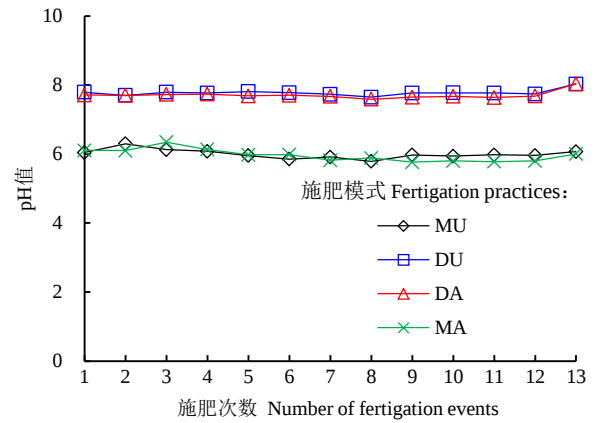


图 3 肥料溶液 pH 值变化情况

Fig.3 Variation of pH for the fertilizer solution

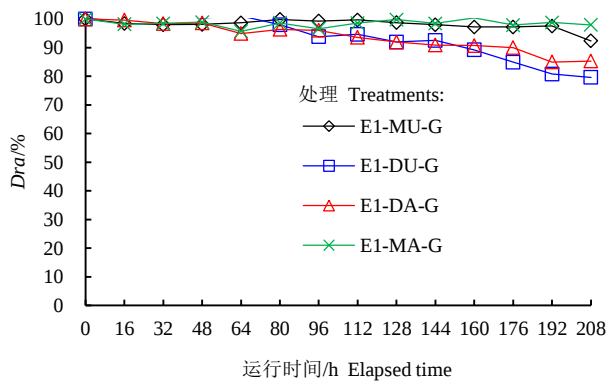
表 4 试验不同运行历时各处理 *Dra* 的方差分析结果

Table 4 ANOVA for the *Dra* at representative system operation durations selected

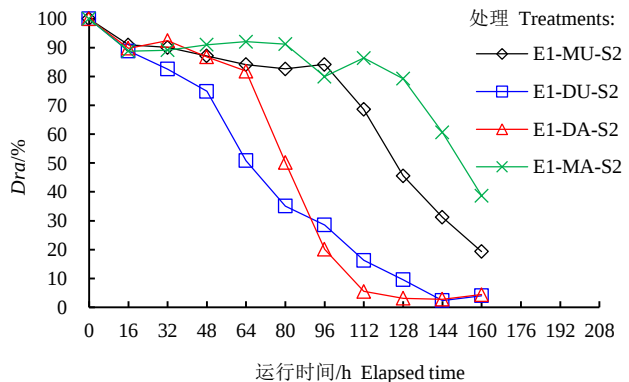
| 因素<br>Factors       | 48 h (3 次施肥 3 fertigation events) |            | 96 h (6 次施肥 6 fertigation events) |            | 208 h (13 次施肥 13 fertigation events) |            |
|---------------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
|                     | <i>F</i> 值                        | <i>Sig</i> | <i>F</i> 值                        | <i>Sig</i> | <i>F</i> 值                           | <i>Sig</i> |
| 水质 Water quality    | 242.1                             | ** (0.000) | 198.0                             | ** (0.000) | --                                   | --         |
| 施肥模式 Fertigation    | 6.1                               | ** (0.001) | 12.8                              | ** (0.000) | 12.1                                 | ** (0.000) |
| 灌水器类型 Emitter types | 4.3                               | * (0.040)  | 4.8                               | * (0.031)  | 25.2                                 | ** (0.000) |

注 \*和\*\*分别代表在  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  水平上显著。

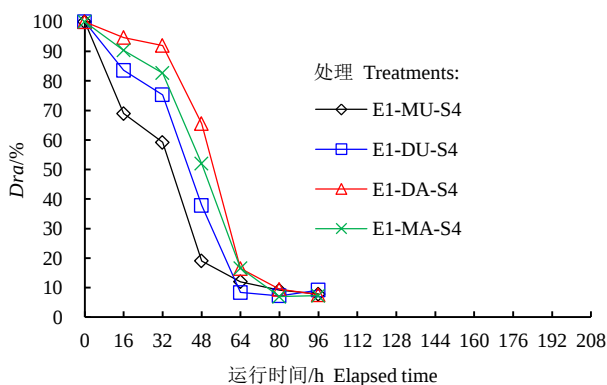
Note \* and \*\* represent significant at the 0.05 and 0.01 level, respectively.



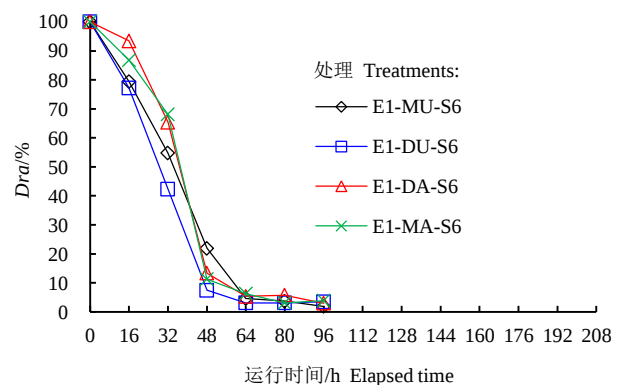
(a) 地下水 Groundwater



(b) 2 dS/m



(c) 4 dS/m



(d) 6 dS/m

图 4 内镶贴片式灌水器不同处理 *Dra* 变化

Fig.4 Temporal changes in the mean discharge ratio (*Dra*) for the treatments with plain emitter applied

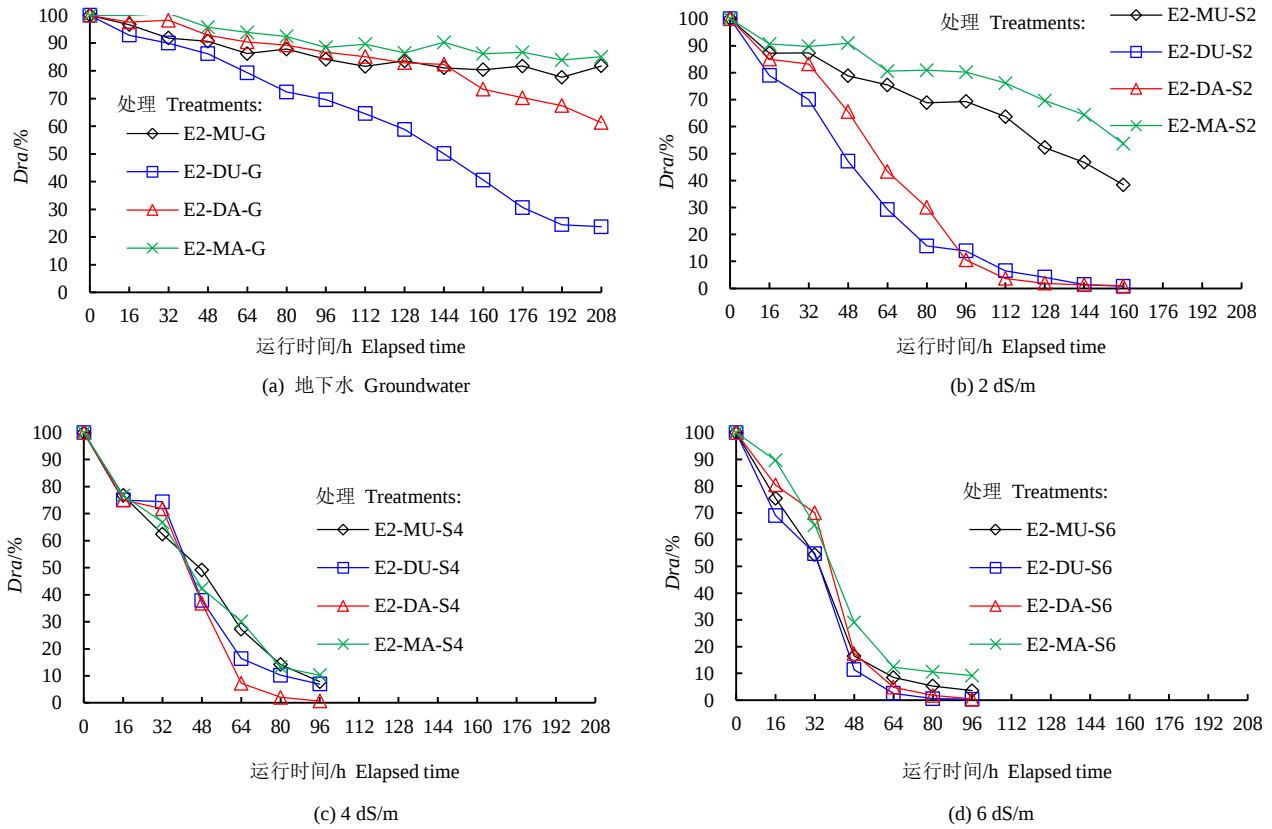

 图 5 单翼迷宫式灌水器不同处理 *Dra* 变化

 Fig.5 Temporal changes in the mean discharge ratio (*Dra*) for the treatments with labyrinth emitter applied

### 2.3 堵塞物质干质量

图 6 给出了不同处理灌水器内堵塞物质干质量 (*DW*) 结果 (图中误差线代表标准差; 相同水质条件, 不同施肥处理标有相同字母表示处理在  $\alpha=0.05$  水平上差异不显著)。从图 6 可以看出, *DW* 基本随灌溉水电导率的提高而增加。例如, 对于内镶贴片式灌水器, 试验结束时, 地下水 (运行 208 h, 施肥 13 次)、S2 (运行 160 h, 施肥 10 次)、S4 (运行 96 h, 施肥 6 次) 和 S6 (运行 96 h, 施肥 6 次) 水质条件 *DW* 均值 (4 种施肥模式) 分别为 0.04、0.39、0.74 和 0.82 g。比较不同施肥模式处理可知, 灌溉水质一定时, 磷酸一铵-尿素 (MU) 和磷酸一铵-硫酸铵 (MA) 处理 *DW* 明显低于磷酸二铵-尿素 (DU) 和磷酸二铵-硫酸铵 (DA) 处理, 地下水、S2、S4 和 S6 灌溉水质条件施用磷酸一铵处理 *DW* 均值分别较施用磷酸二铵处理低 76%、41%、22% 和 19%, 这说明氮磷肥协同施入时, 磷酸二铵较磷酸一铵处理更易形成灌水器堵塞, 该结果与灌水器 *Dra* 结果一致, 也与 MU 和 MA 处理肥料溶液 pH 值较低有关。

### 2.4 堵塞物质矿物组分

图 7 给出了不同处理灌水器内堵塞物质矿物组分。由图 7 可知, 所有处理灌水器内堵塞物质成分一致, 主要为石英 ( $\text{SiO}_2$ )、硅酸盐 ( $\text{K}(\text{Mg}, \text{Al})_{2.04}(\text{Si}_{3.34}\text{Al}_{0.66})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  和

$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )、磷酸盐 ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ ) 和钙镁沉淀 ( $\text{CaCO}_3\text{-O}$ 、 $\text{CaCO}_3\text{-R}$  和  $\text{CaMgCO}_3$ ), 但不同处理灌水器内堵塞物质矿物组分比例差异明显。地下水灌溉条件下, 磷酸一铵-尿素 (MU) 和磷酸一铵-硫酸铵 (MA) 处理堵塞物质以石英为主 (分别占比 60% 和 69%), 其次为硅酸盐 (分别占比 22% 和 24%) > 钙镁沉淀 (分别占比 11% 和 6%) > 磷酸盐 (分别占比 7% 和 1%); 但是, 磷酸二铵-尿素 (DU) 和磷酸二铵-硫酸铵 (DA) 处理堵塞物质以磷酸盐为主 (分别占比 79% 和 66%), 其次为石英 (分别占比 12% 和 21%) > 硅酸盐 (分别占比 7% 和 12%) > 钙镁沉淀 (分别占比 2% 和 1%), 这说明地下水灌溉条件下, 呈弱酸性的磷酸一铵肥料溶液即可有效降低磷酸盐类堵塞物质的产生, 但是呈弱碱性的磷酸二铵肥料溶液会明显加速磷酸根与灌溉水中  $\text{Ca}^{2+}$  等的结合, 形成磷酸盐类化合物, 进而导致灌水器堵塞。微咸水处理条件下, 所有处理堵塞物质均为磷酸盐类堵塞物质占绝对主导的现象, 肥料溶液 pH 值对堵塞物质中磷酸盐占比的影响在 S2 处理中仍有所体现, MU 和 MA 处理堵塞物质中磷酸盐量小于 DU 和 DA 处理的; 但是, 当灌溉水电导率  $> 4 \text{ dS/m}$  时, 施肥模式对灌水器内堵塞物质成分的影响趋于减弱。例如, 在 S4 和 S6 处理中, 所有施肥模式处理灌水器堵塞物质中磷酸盐比例均超过了 85%, 这说明灌溉水电导率较高时, 施入磷肥

与灌溉水中较高质量浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  等极易发生反应, 进而引起灌水器堵塞。

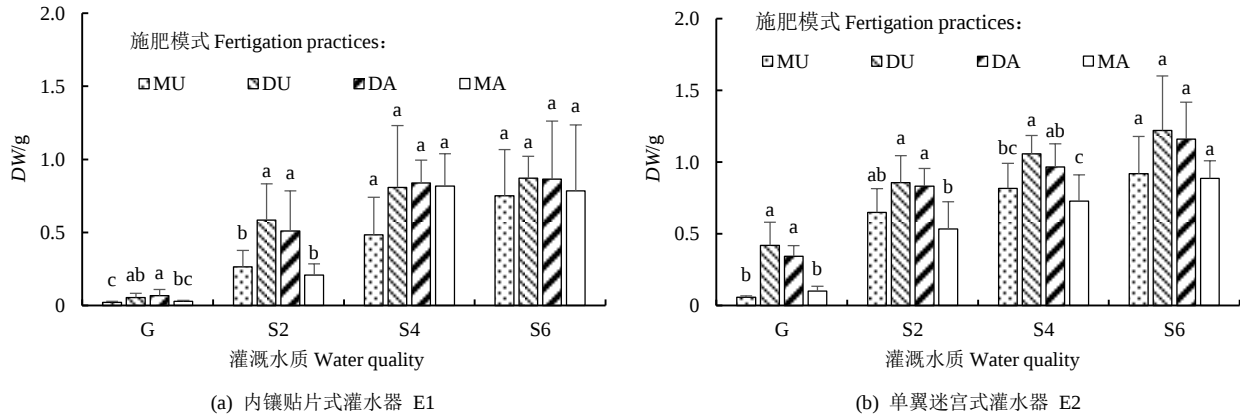


图 6 各处理灌水器堵塞物质干质量

Fig.6 Dry weight (DW) of clogging substances in the emitters for different treatments

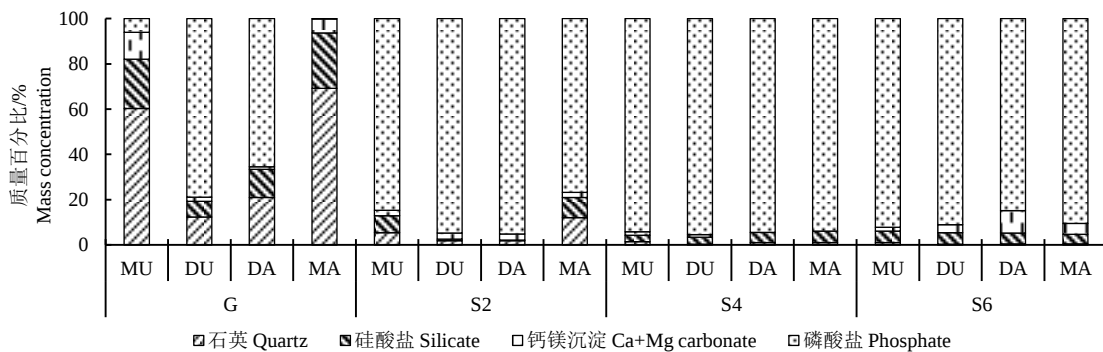


图 7 各处理堵塞物质矿物组分

Fig.7 Mineral constituents of clogging substances in the emitters for different treatments

### 3 讨论

水质是影响灌水器堵塞发生的重要因素之一<sup>[16]</sup>。水肥一体化过程会一定程度上增加灌溉水质的复杂程度, 进而加速灌水器堵塞过程。单一肥料灌溉施肥情况下, 肥料种类、肥料溶液浓度和施肥模式等对灌水器堵塞的影响已得到研究者关注。刘璐等<sup>[7]</sup>研究指出当肥液质量浓度在 0.5%~2.0% 时, 施肥过程对灌水器堵塞风险的影响大小依次为磷肥>尿素>钾肥>复合肥; Zhou 等<sup>[17]</sup>研究表明, 施肥总量给定情况下灌水器堵塞风险随磷肥滴施频率的增加而降低。本试验中 3 d (连续灌溉 2 次后施肥 1 次) 1 个灌水-施肥周期及氮磷混合施入的水肥一体化管理模式更加贴近于田间实际情况, 试验结果表明, 随灌水施肥进行灌水器  $Dra$  明显下降。地下水灌溉条件下, 系统持续运行 13 个灌水-施肥周期后 (208 h), 内镶贴片式灌水器 and 单翼迷宫式灌水器不同施肥处理  $Dra$  均值分别为 89% 和 63%, 而此前在同一试验基地、类似试验条件下进行的地下水滴灌运行试验中系统运行 480 h 时, 2 种内镶贴片式和 2 种单翼迷宫式灌水器  $Dra$  均值分别为 96% 和 73%<sup>[15]</sup>, 较快的  $Dra$  下降速度表明滴灌

施肥过程容易诱发灌水器堵塞, 与以往研究结果一致。但是, 本研究也表明, 在运行 208 h (13 次施肥) 后, 内镶贴片式灌水器  $Dra$  均值仍大于 80%, 属于轻微堵塞水平<sup>[18]</sup>, 滴灌带基本可以满足 4 季作物的灌溉施肥需求 (假定每季作物施肥 3 次), 说明氮磷肥协同施入在常规水源灌溉条件下是完全可行的。地下水灌溉条件下, 磷酸一铵-尿素 (MU) 和磷酸一铵-硫酸铵 (MA) 处理  $Dra$  下降速度基本类似, 但明显低于磷酸二铵-尿素 (DU) 和磷酸二铵-硫酸铵 (DA) 处理, 说明本试验中磷肥是决定灌水器堵塞的关键因素, 可能与磷酸一铵和磷酸二铵肥料溶液分别呈弱酸性和弱碱性有关。

微咸水灌溉条件下, 水中种类丰富且质量浓度相对较高的化学离子会加速灌水器堵塞物质的形成<sup>[2]</sup>。本试验中, 微咸水灌溉处理灌水器  $Dra$  下降速度随灌溉水电导率的升高而明显增大。相关分析表明, 内镶贴片式灌水器 and 单翼迷宫式灌水器堵塞物质干质量与试验结束时的灌水器  $Dra$  均呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.89 ( $p=0.00$ ) 和 -0.92 ( $p=0.00$ ), 这与 Hao 等<sup>[15]</sup>和 Zhou 等<sup>[18]</sup>研究结果一致, 均表明灌水器

流量  $Dra$  随堵塞物质干质量的增加而降低。以上结果表明,灌溉水离子量的增加会明显增加堵塞物质在灌水器内的累积,进而降低灌水器流量。与此同时,微咸水灌溉条件下,氮磷协同施入模式对灌水器堵塞的影响随灌溉水电导率的提高呈下降趋势。对于 S2 处理, MA 和 MU 处理灌水器堵塞风险仍低于 DA 和 DU 处理,但是当灌溉水电导率超过 4 dS/m 时,各施肥模式条件灌水器均发生快速堵塞过程,该结果与 Zhangzhong 等<sup>[4]</sup>研究结果一致,均指出微咸水灌溉条件下灌溉水电导率不宜超过 4 dS/m。

## 4 结 论

1) 微咸水滴灌氮磷协同施入条件下,内镶贴片式灌水器表现出比单翼迷宫式灌水器更好的抗堵塞性能。

2) 滴灌系统灌水器堵塞随灌溉水电导率升高增加明显,当灌溉水电导率>4 dS/m 时,氮磷肥协同施入会导致滴灌系统的快速堵塞,堵塞物质中磷酸盐类沉淀超过 85%。

3) 地下水和电导率为 2 dS/m 的微咸水灌溉条件下,施用磷酸一铵处理灌水器堵塞物质干质量均值分别较施用磷酸二铵处理低 76%和 41%,施用磷酸二铵处理灌水器更易堵塞。施用呈弱酸性的氮磷肥溶液是减缓水肥一体化过程中灌水器堵塞的有效措施。

## 参考文献:

- [1] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.  
WANG Quanjiu, SHAN Yuyang. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 117-126.
- [2] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(4): 187-192.
- [3] HILLS D J, NAWAR F M, WALLER P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASABE, 1989, 32(4): 1 202-1 206.
- [4] ZHANGZHONG L L, YANG P L, ZHEN W G, et al. A kinetic model for the chemical clogging of drip irrigation system using saline water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 223: 105696.
- [5] BOZKURT S, OZEKICI B. The effects of fertigation managements on clogging of in-line emitters[J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 6(15): 3 026-3 034.
- [6] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 81-90.
- [7] 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 228-236.
- [8] 王天志,王迪,徐飞鹏,等.高钙镁离子地下水滴灌施肥系统堵塞效应[J].排灌机械工程学报,2017,35(4):345-350.  
WANG Tianzhi, WANG Di, XU Feipeng, et al. Clogging risk and combined effect of fertigation system in groundwater containing high content of  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$ [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(4): 345-350.
- [9] ASAE Standard. S553: Collapsible Emitting Hose (drip tape) – Specifications and Performance Testing[S]. St. Joseph, Mich, ASAE, 2003.
- [10] ASAE Standard. EP405.1: Design and Installation of Microirrigation Systems[S]. St. Joseph, Mich, ASAE, 2003.
- [11] 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(4): 439-450.
- [12] 李志宏,王兴仁,张福锁.我国北方地区几种主要作物氮营养诊断及追肥推荐研究 I.几种主要作物氮磷施用量的研究[J].植物营养与肥料学报,1997:262-267.  
LI Zhihong, WANG Xingren, ZHANG Fusuo. Nitrogen nutritional diagnosis and recommendation as topdressing fertilizer n for several crops in North China I . recommendation of nitrogen and phosphate fertilizer for several crops in North China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997: 262-267.
- [13] LI J S, ZHANG J J, RAO M J. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(2): 89-104.
- [14] CAPRA A, SCICOLONE B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(4): 355-365.
- [15] HAO F Z, LI J S, WANG Z, et al. Effect of ions on clogging and biofilm formation in drip emitters applying secondary sewage effluent[J]. Irrigation and Drainage, 2017, 66(5): 687-698.
- [16] LI J, CHEN L, LI Y. Comparison of clogging in drip emitters during application of sewage effluent and groundwater[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(4): 1 203-1 211.
- [17] ZHOU H X, LI Y K, XIAO Y, et al. Different operation patterns on mineral components of emitters clogging substances in drip phosphorus

## Effect of Phosphorus and Nitrogen Fertigation on Clogging in Drip Emitters Applying Saline Water

YANG Xiaoqi<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>2</sup>, LIU Hongquan<sup>1\*</sup>, LI Jiusheng<sup>2</sup>

(1. Institute of Urban and Rural Construction, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** 【Objective】 Drip irrigation has been regarded as one of the most effective ways to apply saline water to crops as the water could be irrigated at a high frequency and low discharge rate, resulting in relatively low salinity levels in the soil due to leaching. However, the diverse ionic composition ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.) in saline water may accelerate the formation of clogging sediments, thus obstructing the emitters, has been considered as a major problem in drip irrigation systems. Besides, emitter clogging risk might be increased by the fertigation practice for the drip irrigation system applying saline water. The objective of this paper was to evaluate the clogging process and mechanisms in drip emitters during the application of saline water with combined P and N fertigation.

【Method】 On-site drip irrigation experiments applying saline water were conducted using a plain channel emitter (E1) and a labyrinth emitter (E2) to investigate the effect of the phosphorus and nitrogen fertigation and the water salinity on emitter clogging. In the test, four combined phosphorus and nitrogen fertigation practice were produced by integrating one typical phosphorus fertilizer (Monoammonium Phosphate (MAP) or Diammonium phosphate (DAP) ) with one typical nitrogen fertilizer (Urea (U) or Ammonium Sulphate (AS)). Besides, three saline water qualities with electricity conductivity of 2 (S2), 4 (S4), and 6 (S6) dS/m, respectively, were tested with the groundwater (G) that was considered as the control. The discharge rates of emitters were measured followed by each fertigation event. Several representative emitters were sampled to measure the dry weight (DW) and the chemical constituents of the clogging substances in the emitters at the end of the experiments. 【Result】 The mean discharge ratio (*Dra*) averaged over the E1 treatments with an operation of 96 h was 19% higher than that for the E2 treatments. The plain emitters demonstrated significantly better anti-clogging performance than the labyrinth emitters. Under groundwater irrigation, a relatively slighter decrease of *Dra* with time was observed for the G treatments while emitter clogging increased obviously with water electricity conductivity. A greater DW represents more severe clogging in emitters while a significantly negative correlation was found between the DW and the *Dra*. Phosphorus and nitrogen fertigation produced rapid clogging of emitters in the drip irrigation system applying saline water with electricity conductivity larger than 4 dS/m. Phosphate sediments account for more than 85% of DW for the S4 and S6 treatments. The emitter clogging occurred more easily for treatments with DAP fertigated than those for the treatments with MAP fertigated. The averaged DW of the clogging substances over the treatments with MAP applied were 76% and 41% lower than those for the treatments with DAP applied under groundwater and saline water (S2) application, respectively. 【Conclusion】 The phosphorus-coupled nitrogen drip fertigation should be applied with cautious applying saline water with electrical conductivity higher than 4 dS/m. Using acid phosphate and nitrogen mixture fertilizer is a promising way to alleviate the emitter clogging caused by iron components in saline water.

**Key words:** drip irrigation; emitter; fertigation; saline water

责任编辑: 陆红飞