

文章编号:0559-9350(2018)01-0103-12

滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展

李云开¹, 周 博^{1,2}, 杨培岭¹

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 威斯康辛大学麦迪逊分校 农业与生命科学学院, 威斯康辛 WI53706, 美国)

摘要: 滴灌系统灌水器堵塞问题直接影响灌水均匀度、系统运行效益和使用寿命, 是滴灌领域的国际难题之一, 而地下滴灌系统中负压吸泥作用与根系入侵效应使得灌水器堵塞机理更为复杂。尤其是水资源短缺与水污染并重的现状迫使滴灌水源多元化、滴灌系统由单一灌溉功能逐步向灌溉施肥等多功能转变以及滴灌技术在高附加值的多年生作物上的应用等因素, 对灌水器抗堵塞能力提出了更高的要求。本文通过回顾滴灌系统灌水器堵塞问题研究历程, 系统总结了灌水器堵塞类型、测试与评价方法以及发生特征与预报方法, 通过建立堵塞物质提取与精细测试方法, 分别从堵塞物质形成与生长过程、水源中多物质运移过程两个角度, 揭示了灌水器堵塞耦合诱发机制与持续增长机理, 通过综合控制堵塞物质来源(前控)、提升自身抗堵塞能力(中排)和有效清除堵塞物质(后清)等多角度建立了灌水器堵塞控制方法, 最终提出该领域急需进一步研究的问题和方向。本文旨在为解决滴灌系统灌水器堵塞问题及推动滴灌技术规模化应用与推广提供理论支撑。

关键词: 滴灌; 灌水器; 堵塞特征; 堵塞物质; 机理; 控制

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170931

1 研究背景

灌水器是滴灌系统的核心, 其主要作用是通过内部复杂的流道结构对有压水流进行消能, 保证水源通过后可以均匀、稳定地供给作物。但因其消能流道尺寸狭小(仅0.5~1.2 mm), 极易被滴灌水源中的固体颗粒物、微生物、化学沉淀、有机质、氮磷等杂质附着, 导致灌水器堵塞^[1-2], 轻则影响灌水均匀性和滴灌系统使用寿命, 重则直接导致系统报废。例如, 新疆建设兵团地下滴灌技术应用面积就因灌水器堵塞问题被迫从2005年的12万亩锐减至2014年的1000亩。灌水器堵塞问题已经成为滴灌领域的国际难题^[2-4]。

尤其目前水资源紧缺与水环境污染问题并存, 迫使滴灌水源多元化, 不仅地下水以及江河、湖泊、坑塘等地表水, 再生水、微咸水、黄河水等劣质水也常常作为滴灌水源^[2-5], 这些水源水质复杂, 其中的固体颗粒物、盐离子、藻类、有机质以及微生物等物质会发生一系列物理、化学、生物动力学过程, 使得滴灌系统灌水器堵塞风险更大、堵塞机理更复杂。与此同时, 滴灌系统从单一灌溉需求逐步向灌溉、施肥、补气、加药等多功能转变, 水肥气药多物质共存体系易于进一步发生耦合作用, 这显著增加了灌水器堵塞风险^[6-7]。虽然在新疆地区大面积成功推广的大田作物一次性薄壁滴灌带产品在单生育期缓解了滴灌系统短期应用条件下的灌水器堵塞问题、且大大降低了生产成本, 但同时存在滴灌带质量一般、灌水均匀性较差、回收成本较高、环境污染严重等一系列问题, 更是无法满足滴灌技术在高附加值的多年生经济作物上应用时存在的问题。此外, 地下滴灌系统除

收稿日期: 2017-09-21; 网络出版日期: 2018-01-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180115.1053.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51321001, 51709261)

作者简介: 李云开(1975-), 湖南芷江侗族自治县人, 教授, 博士生导师, 主要从事滴灌系统抗堵塞关键技术与装备研究。

E-mail: liyunkai@126.com

了上述问题，负压吸泥作用和根系入侵效应更是加剧了灌水器堵塞风险。其中，负压吸泥是一种“过程性”堵塞，土壤颗粒因为系统关闭时的负压作用吸入灌水器，聚集在灌水器出口甚至进入流道内部，导致灌水器出流减小；而根系入侵是一种相对更不稳定的“触发式”堵塞，一旦根系从出口进入灌水器，灌水器流量往往迅速下降^[8]。

基于此，本文通过梳理滴灌系统灌水器堵塞发生特征、诱发机理与控制方法领域的研究成果，挖掘该研究领域存在的关键问题，提出了急需进一步研究的问题和方向，旨在为解决灌水器堵塞问题，保障滴灌系统长期、高效运行，进而推动滴灌技术规模化发展提供支撑。

2 滴灌系统灌水器堵塞发生特征

2.1 灌水器堵塞发生类型 滴灌水源水质特征是导致灌水器堵塞最主要、最直接的原因，根据水质诱发因素可将灌水器堵塞分为物理、化学和生物堵塞3种类型^[9]。物理堵塞主要由过滤后进入滴灌系统的水源中的小粒径有机悬浮物和固体颗粒物引起的，主要受颗粒物粒径和浓度影响，一般来说粒径越大、浓度越高，物理堵塞越严重^[10-11]；化学堵塞通常是由水源中可溶解的化学物质在一定条件下形成的不溶性沉淀导致的，一般来说，水质越硬、离子含量越高越容易诱发化学堵塞^[3,12]；生物堵塞相对比较复杂，既包括水源中的细菌等微生物、藻类、动植物及其产出物(虫卵、代谢物)等生物质进入滴灌系统后附着在灌水器流道而导致的堵塞，广义上也包括地下滴灌系统中植物根系入侵灌水器引起的堵塞^[13-14]，一般来说，水源中微生物数量越多、群落组成越复杂，越容易发生生物堵塞^[14-15]。综合来看，适宜滴灌系统的水源关键水质要素及控制阈值见表1。

表1 适宜滴灌系统的水源关键水质要素控制阈值

序号	主要水质要素	主要结论
1	不溶性固体	不溶性固体含量大于500mg/L时容易发生堵塞，而大于2000mg/L时会发生严重堵塞 ^[9,13]
2	颗粒物粒径	粒径越大越容易发生沉积，大于50μm时灌水器堵塞急剧增加 ^[11,13]
3	硬度(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)	硬度小于150mg/L不容易发生堵塞，而大于300mg/L会引起严重堵塞 ^[3,13]
4	pH	pH>8时容易发生严重堵塞 ^[9]
5	Fe ²⁺	含量大于0.1mg/L时容易产生堵塞，大于1.5mg/L时会引起严重堵塞 ^[17]
6	Mn ²⁺	含量大于0.1mg/L时容易产生堵塞，大于1.5mg/L时会引起严重堵塞 ^[9,16]
7	H ₂ S	含量大于0.5mg/L时容易产生堵塞，大于2.0mg/L时会引起严重堵塞 ^[9]
8	电导率	低于4dS/m时不容易发生堵塞 ^[3]
9	细菌总数	大于10 000个/mL时容易产生堵塞，大于50 000个/mL会引起严重堵塞 ^[9]

根据联合国粮农组织顾问统计，灌水器堵塞过程中物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞发生概率分别为31%、22%和37%，其它类型占10%。Gilbert等^[18]的研究结果则表明55%的灌水器堵塞是由物理因素引起的，而物理和生物因素共同作用导致的灌水器堵塞占87%。在实际工程应用中，由于水污染问题日益严重，水质特征更加复杂，灌水器堵塞往往表现为物理、化学、生物要素中两者或三者协同作用、耦合互促导致的复合型堵塞^[4]。

2.2 灌水器性能测试与评价方法 常用的灌水器性能测试方法分为间接测试和直接测试，且以间接测试为主。间接测试主要通过室内短周期和长周期测试进行，虽然试验条件相对精细、可控，但试验周期较短、测试次数较少，说服力相对有限^[19-20]；直接测试即通过在田间铺设滴灌管直接进行测试，虽然能够高度还原工况，使得试验结果更贴近田间真实情况，但无法保证水质特征恒定，且成本相对较高^[2-4]。另一方面，灌水器实时出流受到水温、工作压力、灌水频率、地形高差以及相邻灌水器堵塞状况等多因素的共同影响，在室外条件下影响效果更加显著，因此需要对灌水器即时流量进行校正，这也是之前大多数研究中并未考虑的问题。实际上，根据不同水源滴灌条件下的测试结果，校正前后的灌水器流量相差3%~8%^[2,4]，必须予以重视。校正后的流量用于计算灌水器堵塞评

估参数,才可以准确评估灌水器堵塞程度。

美国农业工程师学会(ASAE)2003年发布的“微灌系统田间评价方法”仍是目前最权威的滴灌系统性能评价标准^[21],其中总结了常用的评估参数,包括评价灌水器生产质量的制造偏差(manufacturing variation coefficient, C_v),评价单个灌水器堵塞的相对流量(relative outflow, Q_r)和多个灌水器整体堵塞程度的平均相对流量(discharge ratio variation, Dra)和差异程度的流量偏差(q_{var}),评价灌水均匀性的克里斯琴森均匀系数(Christiansen coefficient of uniformity, CU)、设计均匀度(design emission uniformity, EU)和统计均匀度(statistical uniformity coefficient, U_s)以及灌水器堵塞程度分布特征等。然而,目前大部分相关研究成果中只考虑了其中一部分,从灌水器堵塞发生特征的某方面进行评价。在此基础上,冯吉^[4]从灌水器个体和滴灌管(带)多个灌水器两个层面,初步建立了全面描述灌水器堵塞特征的方法。其中,灌水器个体主要通过 Q_r 、随机性指数(ΔF_Q^t)和可恢复性指数(R_Q^{CD})来表现单个灌水器在某段时间内动态出流的波动征及存在的随机性,但同时具有一定的可恢复能力;而整条滴灌管(带)所有灌水器堵塞发生的整体性和随机性则分别通过 Dra 和 CU 进行表征,这两个参数均表现出持续变化的特征(图1)。

2.3 灌水器堵塞特征与预报方法 摸清滴灌系统灌水器堵塞发生特征是揭示灌水器堵塞诱发机理进而建立堵塞控制方法的前提和基础。已有学者从物理、化学、生物水质要素成因角度对灌水器堵塞特性开展研究工作,整体来看,不同诱因的灌水器堵塞均表现出相似的发生特性^[2-4,22]:单个灌水器流量变化的波动性和随机性显著,且不同堵塞程度下表现出的可恢复性持续降低,但是由于堵塞物质与壁面的黏附作用不断加强,使得灌水器的堵塞处于不断加深状态,单个灌水器堵塞发生的波动性、随机性和可恢复性并不会改变滴灌系统所有灌水器整体堵塞持续加重的特性(图1)。整体来看,灌水器整体堵塞特征表现出随系统累积运行先平缓波动-后线性下降的趋势。

为了评估灌水器堵塞发生特性,现有研究结果大多通过实测数据进行回归分析获取经验公式来预测灌水器流量^[23-24],或者通过基于威布尔分布和蒙特卡洛法的统计模型预估灌水器堵塞控制起始时间^[25]。对于灌水器自身抗堵塞能力而言,可以使用灌水器抗堵塞性能评估指数进行评估,并通过灌

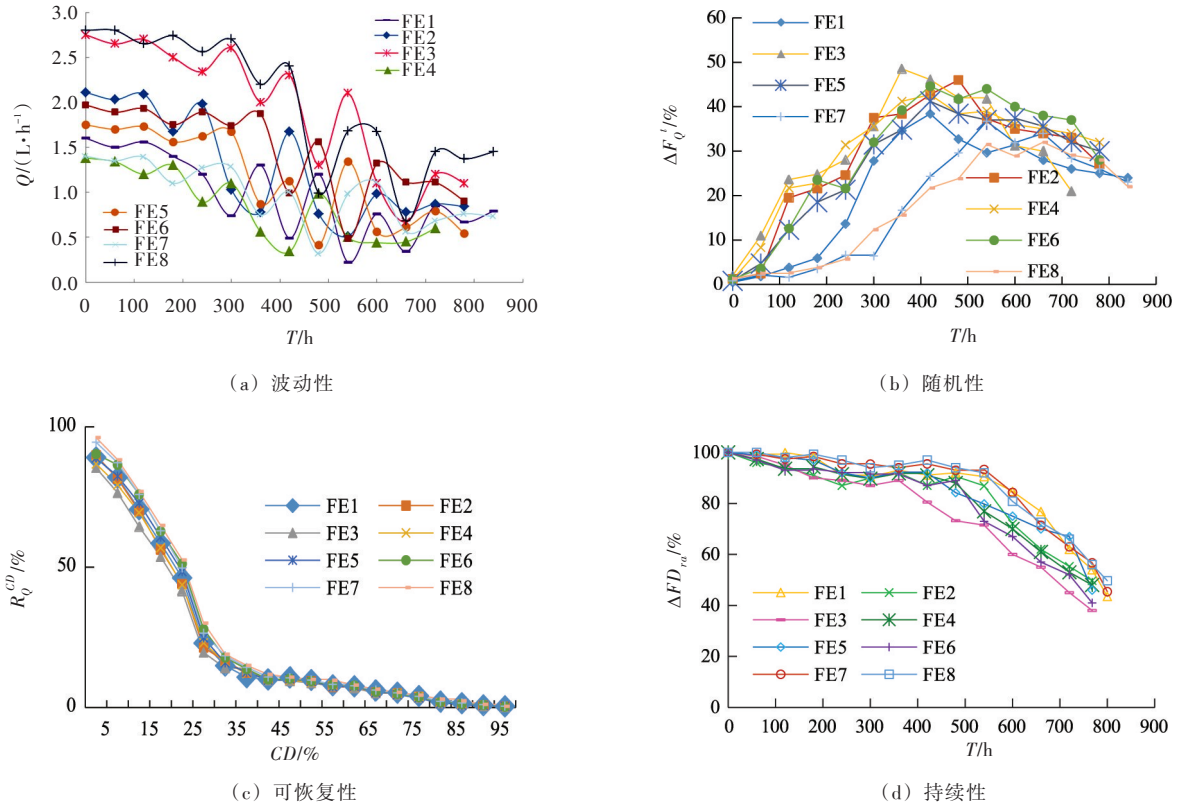


图1 滴灌系统灌水器堵塞动态发生特征

水器额定流量以及流道长、宽和深进行估算，作为快速评价灌水器自身抗堵塞能力及筛选适宜灌水器产品的有效参考^[26]。但是，目前相关的研究结果都是基于室内条件下的研究和测试，并没有应用于实际滴灌工程后反馈评估效果准确性的相关报道，需要做进一步的验证和探讨。

3 滴灌系统灌水器堵塞诱发机理

3.1 堵塞物质测试与分析方法 滴灌系统灌水器堵塞与其内部堵塞物质的形成和生长密切相关^[14]，因此，摸清堵塞物质来源与其特征组分是揭示灌水器堵塞诱发机理，进而解决灌水器堵塞问题的前提。从40年前开始，相关学者陆续探索了地下水、河湖水、水库水、雨水、再生水、高含沙水、微咸水等多水源滴灌条件下不同类型灌水器堵塞物质中各特征组分相对含量^[3-4,10,14]，结果表明灌水器堵塞物质为一种多物质共存体系，是由微生物群体(细菌、原生动物、真菌等)及其分泌的胞外多聚物以及固体颗粒物等多物质构成的三维异质结构和功能整体^[27]。但是由于测试技术的限制，上述研究结果多为定性研究，定量结果十分匮乏。

表2 不同堵塞类型堵塞物质各组分含量对比 (%)

堵塞物质 组分	复合堵塞 ^[4]			物理堵塞 ^[10]	化学堵塞 ^[3]	生物堵塞 ^[14]
	高含沙水	混配水	地表湖泊水	常规高含沙水(干净沙)	自行配置微咸水	再生水
SP	69.3~70.7	49.6~51.3	44.2~45.3	> 87.5	/	97.9~98.0
C-MP	28.3~31.5	48.8~50.3	48.9~55.3	/	> 88.1	/
PLFAs	0.08~0.10	0.10~0.12	0.08~0.10	/	/	0.73~0.78
EPS	0.54~0.62	0.66~0.84	0.44~0.78	/	/	1.24~1.32

随着现代精细测试技术的快速发展，已经逐步探索出堵塞物质表面形貌特征^[28]、三维分布特征^[29]及特征组分的测试方法^[14]，建立了灌水器堵塞物质堵塞测试体系。灌水器内部堵塞物质特征组分主要包括物理态(泥沙颗粒，solid particle，SP)、化学态(钙镁沉淀，Ca-Mg precipitation，C-MP)以及生物态(磷脂脂肪酸，phospholipid fatty acids，PLFAs；胞外聚合物，extracellular polymeric substances，EPS)，但已有研究结果大多集中于其中一部分，全面测试各特征组分的研究报道非常罕见。综合现有研究结果来看，发生复合堵塞的灌水器中各特征组分分别占堵塞物质总重的44%~71%，28%~55%，0.08%~0.12%，0.44%~0.84%(表2)；以物理堵塞和化学堵塞为主的灌水器堵塞物质分别主要为SP和C-MP，其含量分别占87.5%和88.1%以上；而以生物堵塞为主的灌水器堵塞物质中的PLFAs和EPS所占比重相对较高，分别为0.73%~0.78%和1.24%~1.32%，但仍然以SP所占质量比最高，达到97.9%~98.0%。

3.2 灌水器堵塞诱发机理 影响滴灌系统灌水器堵塞物质的因素众多，其形成和生长过程是灌溉水质等环境因素^[5,9]，灌水器类型、流道几何参数等结构特征^[2,20]，毛管内流速、流道近壁面水力剪切力等水力学特征^[31]以及工作压力、滴灌频率等系统运行模式^[31-32]等多种因素共同影响下的综合表现。基于堵塞物质特征组分对上述影响因素的动态响应特征，目前已经建立了堵塞物质特征组分生长动力学模型，定量描述了堵塞物质“生长适应期-快速增长期-动态稳定期”三段式生长过程^[4,33-34]：在系统运行前期，由于水源中的固体颗粒物、微生物、有机质等多种物质处于初始吸附阶段，堵塞物质中微生物及其分泌的胞外聚合物含量整体较少、吸附能力较弱，集中在流速较低的流动滞止区生长，该阶段堵塞物质组分增长较慢。此后，随着堵塞物质中微生物基数增加，在营养物质供给充足的条件下，微生物数量和种类迅速增多，由于堵塞物质表面结构疏松多孔的特征，内层的微生物群落也能获得较多的营养物质，新陈代谢活跃、分泌的黏性胞外聚合物也迅速增加。然而，当堵塞物质不断生长直至趋于环境最大容纳量时，堵塞物质在水力剪切力等外力作用下脱落后再生长的动态过程逐渐趋于平衡，堵塞物质特征组分含量也趋于恒定。

目前来看,地下水、再生水、高含沙水、微咸水、河湖库地表水等常见水源滴灌条件下,基本不存在单一堵塞类型独立存在的情况,不同水源、工况条件下灌水器堵塞特征的实质差别在于哪种类型的堵塞占据主导。这主要是因为灌水器内部堵塞物质各组分间存在显著的线性正相关关系,而灌水器堵塞参数与堵塞物质特征组分含量间也存在显著的正相关关系^[14,33]。堵塞物质各特征组分之间相互影响、耦合互促(图2):当固体颗粒物携带微生物进入灌水器流道并发生沉积后,在管道系统内不断附着-生长-脱落-衰亡,微生物在颗粒物之间的空隙附着生长并分泌出黏性的EPS,进而继续吸附颗粒物和微生物。随着堵塞物质的生长其厚度不断增加,堵塞物质黏附力降低,在水流脉动和水力剪切力作用下,堵塞物质会脱落随水流进入灌水器流道内,易于在流道内水流剪切力较低的部位(主要为流道进口、出口)沉积,导致流道尺寸不断变小^[30],导致灌水器堵塞不断加深。由此可见,灌水器流道壁面附着的堵塞物质——附生物膜的形成是灌水器堵塞发生的诱因。

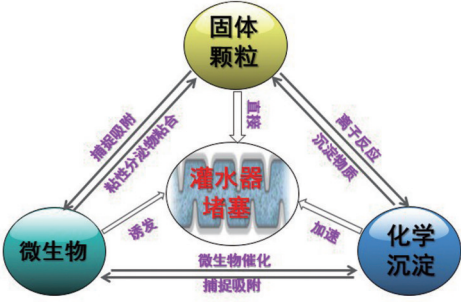


图2 灌水器堵塞耦合互促机理

3.3 灌水器堵塞物质形成的调控途径 从灌水器自身抗堵塞能力的角度来看,其流道设计参数及组合对灌水器堵塞影响显著。已有学者利用计算流体力学(CFD)方法研究了灌水器流道内部固-液两相流特性,并根据水力学特征确定了灌水器流道各参数阈值及适宜组合模式^[35]。为了量化灌水器流道特征参数作用于灌水器堵塞物质形成和生长的途径,需要借助结构方程模型中的路径分析法。结果表明,灌水器内部微域水力学特征参数——断面平均流速(v)与堵塞物质各特征组分间存在显著的线性负相关关系($R^2>0.80^{**}$, $p<0.01$),是直接影响堵塞物质形成和生长的关键因素^[34]。而断面平均流速作为灌水器流道设计参数的综合表征,主要受到两个无量纲参数—— W/D 和 $A^{1/2}/L$, (其中, L 、 W 、 D 和 A 分别表示流道长、宽、深和横截面积)的影响($R^2>0.72^{**}$, $p<0.01$)。对于灌水器堵塞物质各特征组分而言, SP 、 $C-MP$ 对灌水器堵塞以直接作用为主, $PLFAs$ 与 EPS 主要通过影响堵塞物质的理化成因间接引发灌水器堵塞, $C-MP$ 同时也在一定程度上通过影响 SP 间接影响堵塞发生过程。

4 灌水器堵塞物质持续生长机理

4.1 灌水器内部流动可视化技术 实现灌水器流道内部流动可视化是摸清灌水器内部多物质运移过程的前提。但是灌水器复杂流道通常仅有0.25~1 mm,处于微观(1~100 μm)和宏观(>1 mm)之间的介观尺度,常规手段难以实现可视化。经过多年探索,相关学者通过激光多普勒测速技术(laser doppler velocimetry, LDV)^[36]、微尺度流体粒子图像测速技术(micro particle image velocimetry, micro-PIV)^[37]、数字粒子图像测速技术(digital particle image velocimetry, DPIV)结合平面激光诱导荧光测速技术(planar laser induced fluorescence, PLIF)^[38]实现了灌水器内部水流可视化;利用粒子图像测速技术(PIV)^[39]、粒子跟踪测速技术(particle tracking velocimetry, PTV)^[40]实现了灌水器内部颗粒物运移可视化。然而,流道内部多物质流动的可视化过程面临测试模型与荧光粒子等方面的技术瓶颈。由于灌水器流道狭窄且边界复杂,滴灌管(带)不透明,需要通过适宜的透明原型^[38]、流道放大模型^[41]、平面模型^[42]或者单元段模型^[43]等实现测试模型的简化和透明化;而示踪粒子需要综合考虑

粒子的流动跟随性、成像可见性、散布均匀度、浓度以及质量分数等条件。相关学者不断突破创新,最终建立了一种将单元段模型、DPIV、PLIF等技术相结合的准三维全场无扰测试方法,实现了灌水器流道内部多物质流动的可视化^[38]。

4.2 灌水器内部固-液-气多相耦合运动的 CFD 分析方法 计算流体力学(CFD)方法在滴灌领域成功应用,通过灌水器内部流场数值模拟与分析为快速、直观研究灌水器内部流动特征提供了一种新的手段。目前,相关分析软件层出不穷,包括 ANSYS FLUENT、NUMECA、CFX、STAR-CD 等。其中 FLUENT 是目前应用较多的软件,有关学者结合有限元法^[44]、壁面函数法^[45]、非定常数值计算模型^[46]等方法对灌水器内部水流及颗粒物运动进行了数值模拟与分析。

模拟过程中使用的湍流模型可以分为直接数值模拟方法(DNS)和非直接数值模拟方法。直接数值模拟方法是指直接求解瞬时紊流控制方程,该方法对计算机的要求非常高,目前还未广泛用于实际工程计算中。非直接数值模拟方法是设法简化紊流,根据采用的近似和简化方法不同,可分为大涡模拟(LES)和 Reynolds 平均法(RANS)。其中 LES 是介于 DNS 与 RANS 之间的湍流数值模拟方法,模型能够捕捉到更小的湍流结构,适用于灌水器微小流道内部流体计算研究;RANS 的优点是适用范围广、精度合理,但它是个半经验公式,在计算例如强旋流、弯曲壁面流动或弯曲流线等复杂流动时,会产生一定失真。因此学者们对它进行改造,提出 RNG $k-\varepsilon$ 模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,广泛应用于灌水器内部固-液-气多相耦合运动的 CFD 分析^[47]。

4.3 灌水器内部堵塞物质持续生长机理 已有学者通过上述可视化测试与 CFD 模拟方法对灌水器流道内部固液两相流特征进行研究,结果表明,流场中水流和颗粒物较为清晰地分为沿流动方向的主流区和贴近边壁处的漩涡区。主流区流速分布基本一致,且保持在 3 m/s 以上,当主流绕过齿尖时,流束发生明显的偏转,使得主流在进入下一单元流道空腔时偏转到一侧的壁面,在边界摩阻的作用下,与另一侧的壁面之间形成回流漩涡,漩涡中心处流速在 0.5 m/s 以下,边界处流速为 1 m/s 左右。悬浮颗粒等物质在主流中的运动速度与主流流速基本相同,只是在锯齿迎水面的根部及背水面处速度较低,部分颗粒出现漩涡,颗粒运动发生滞后。在这种情况下,颗粒与边壁碰撞后逐渐被吸附到壁面附着的附生生物膜表面并持续生长。颗粒物及营养物质等多物质随滴灌水源进入灌水器后的运移-沉积-附着-脱落-再生长过程是导致堵塞物质持续生长的主要原因^[14,28,30]。但是,适宜不同条件的模拟模型目前并没有定论,关于灌水器内部固-液-气多相耦合的相关报道也极为罕见。

5 滴灌系统灌水器堵塞控制方法

灌水器内部堵塞物质的形成和持续生长是诱发灌水器堵塞并持续加重原因,因此,以限制灌水器内部堵塞物质生长过程为靶向目标,目前已经形成了“前控”——控制堵塞物质来源(包括水质控制、沉淀及过滤设备选型配置、酸氯处理配合管道冲洗)、“中排”——提升自身抗堵塞能力(灌水器流道优化设计与材料改性)、“后清”——有效清除堵塞物质(微生物拮抗、电化学清除)相结合的灌水器堵塞控制方法:

5.1 “前控”——控制堵塞物质来源

(1) 水源水质控制。水质因素是影响灌水器堵塞最主要、最直接的原因。水质越好,灌水器堵塞机率越低、堵塞程度越轻。因此,应依据《农田灌溉水质标准》^[48]和《微灌工程技术规范》^[49]严格控制各水质特征参数阈值。尤其是使用再生水、微咸水、高含沙水等劣质水源进行滴灌时,单独使用某项水源前处理技术很难满足水质要求,通常需要采用反硝化生物滤池+超滤+臭氧接触池+紫外线消毒等组合工艺以及混凝沉淀、介质过滤(含生物过滤)、膜处理、氧化等深度处理技术^[50]。除此之外,目前还出现了一些新型水处理技术,比如微纳米气泡杀菌技术,即利用微纳米气泡爆炸时的能量实现污染物的氧化降解和水质净化^[51];或者借助磁化处理技术改变溶液的物理化学特性(溶解度、电导率、表面张力和 pH 等),磁化后软化的水质可以有效地防治灌水器化学堵塞,在使用微咸水进行滴灌时效果显著^[52]。

(2)沉淀、过滤设备合理配置。合理配置沉淀、过滤设备可以有效去除水源中粒径较大的杂质,降低灌水器堵塞风险。尤其是使用高含沙水进行滴灌时,成功的泥沙沉淀、过滤技术是系统正常运行的基础。目前常见的沉沙池类型包括直线形沉沙池、曲线形沉沙池、沉沙条渠、混合形沉沙池等,也包括一些特殊形式的沉沙池。科研工作者围绕沉沙池结构设计、流场分布、泥沙沉降规律和计算方法以及运行设计、观测等方面开展了大量卓有成效的工作,得出了适宜不同工况条件下的沉沙池关键参数设计阈值^[53-54]。其中,重力沉沙过滤池通过沉沙池和过滤网结合的形式,集沉沙过滤功能为一体,具有体积小、占地少、造价低等优势,泥沙去除率可以达到31%~60%,是目前比较热门的发展方向之一。

不同的过滤器组合模式对滴灌水源的过滤效果也差异明显。综合目前研究结果,离心过滤器(一级过滤)+砂石过滤器(二级过滤)+网式/叠片过滤器(三级过滤)是常见的过滤器分级配置模式。当使用高含沙水、微咸水等进行滴灌时,需要同时配置三级过滤。如果高含沙水源中颗粒物较细,离心式过滤器效果不佳,可以直接省掉,同时配置暗渠结构提升砂石过滤器的过滤性能,滤料前后浊度可以降低20%~45%,结合反冲洗过程可以达到50%~80%^[17,23]。对于再生水以及河湖库地表微污染水等,砂石过滤器+网式/叠片过滤器效果较好。当滴灌水质较好时,可以直接使用网式/叠片过滤器作为过滤系统。目前来看,具有自清洗功能的砂石过滤器和叠片过滤器产品是过滤器研发的重要趋势^[55]。

(3)酸氯处理+毛管冲洗。酸氯处理和毛管冲洗是目前最常用的堵塞控制方法之一。加氯处理是利用氯的强氧化作用杀死微生物(细菌)或抑制其增殖过程,进而抑制堵塞物质生长。然而,目前不同学者在加氯浓度、注入频率、注入方式等关键运行参数的研究结果差异很大,例如加氯浓度范围从1~20 mg/L到100~500 mg/L,加入方式也有连续注入、间歇注入和定期注入等,甚至出现了由于注入时机、控制浓度和保持时间不当导致灌水器堵塞加剧的情况^[56],需要进一步研究、验证。另一方面,毛管冲洗可以提高灌水器流量5%~8%,恢复效果主要受到滴灌方式、灌水器类型和冲洗模式的影响。已有研究表明,加氯处理配合毛管冲洗可以有效控制不同水源滴灌条件下灌水器堵塞问题^[57],例如再生水滴灌系统中,合理的氯处理+毛管冲洗模式可以分别提高灌水器 D_{ra} 和 CU 7.4%和10.3%以上。而对于以化学堵塞为主的微咸水滴灌系统,酸处理对化学沉淀有较好的清除效果,硫酸、盐酸和磷酸等无机酸是比较常用的类型。加酸量需要综合考虑水源离子组分、pH等因素,一般可以通过滴定方法确定。考虑到水质的波动变化,往往会进行多次滴定试验。对于大部分pH在8.0左右的水源来说,加入1 mol/L的无机酸通常可以将pH值降至6.0~6.5,这也是比较适宜pH范围^[3]。

5.2 “中排”——提升自身抗堵塞能力

(1)灌水器流道优化设计。提高灌水器自身抗堵塞能力是缓解灌水器堵塞问题的根本,而提高灌水器自身抗堵塞能力的核心是流道边界优化。目前流道边界优化主要有两种核心思想:一种是传统的主航道抗堵塞设计方法,该方法认为应该消除流道内流动滞止区和低速区,即消除泥沙容易淤积的漩涡区域,仅保留灌水器主流区来增强灌水器流道内颗粒物的输移能力,让颗粒物尽快排出灌水器外,从而降低灌水器堵塞^[36];另一种是流道漩涡洗壁抗堵塞设计方法,该方法认为应该保留流道内流速滞止或低速的漩涡区,对壁面夹角进行圆弧优化以使漩涡充分发展、水流旋转起来,提升水流对流道壁面的自清洗能力,进而降低堵塞物质的附着、促进堵塞物质的脱落,以此提高灌水器抗堵塞能力^[58]。

(2)灌水器材料改性。材料改性是提高灌水器自身抗堵塞能力的另一种有效方法,主要是通过添加特殊抗菌类材料降低微生物的活性、抑制堵塞物质附着能力,从而减少堵塞物质的形成和生长。NETAFIM公司最早曾探索性地在滴灌灌水器中加入有机砷10-oxybisphenoxyarsine,取得了一定的抗堵效果,但有机砷化合物具有潜在毒性,存在一定的风险,因此并未长期投入。此后该公司推出的Bioline压力补偿型系列产品,该系列将灌水器浸入抗菌剂一段时间后再用于滴灌管生产,以抵制微生物积聚和生长,但由于成本较高,也并未大面积打入市场。目前该方面急需系统研究,取得重大

突破。

5.3 “后清”——有效清除堵塞物质

(1)微生物拮抗。微生物拮抗关系是指微生物在其生命活动中,通过产生某种代谢产物或改变环境条件抑制其它微生物的生长繁殖,甚至将其杀死其它的现象。已有学者探索性地将3种农业常用的拮抗细菌添加到使用再生水滴灌系统后已发生堵塞的灌水器中,在14天内流量近乎为0的灌水器流量几乎完全恢复^[59]。微生物拮抗技术为清除堵塞物质提供了一种新的思路与方法。后续学者通过培养、分离、筛选灌水器堵塞物质中的优势菌,进而选用抗病性能强的广谱型农用芽孢杆菌,筛选出了与灌水器堵塞物质优势菌拮抗作用较强的枯草芽孢杆菌和内生芽孢杆菌^[60],但如何构建合理、长效、安全的微生物拮抗控堵模式,并实现产业化生产和规模化推广仍需进一步研究。

(2)电化学清除。电化学方法主要是利用水在电压作用下被电解成的活性氯、活性自由基等物质,破坏菌类及藻类的细胞膜结构、核酸、蛋白质及其他大分子物质,使细胞失活,进而清除堵塞物质。目前已有公司推出了基于该原理的除垢棒产品,通过引入高电压、低电流,使微生物和颗粒物带有相同电荷而互相排斥^[61],从而清除壁面附着的堵塞物质,但目前该领域的研究仍处于起步阶段。

5.4 根系入侵与负压吸泥堵塞控制方法 针对地下滴灌系统负压吸泥作用,已有学者提出无纺布包裹滴头^[62]、在毛管末端增加冲洗管^[63]等方法。以色列NETAFIM公司开发了出口处带“舌片”的地下滴灌系统专用灌水器系列,PLASTRO公司也发明了一种灌水器出口可以在系统停止灌水时自动锁闭的内镶式压力补偿式滴头。王荣莲等^[64]比较了不同灌水器类型对抗负压堵塞的影响,发现小流量灌水器在防止负压堵塞方面具有一定的优势。

针对地下滴灌系统根系入侵效应,于颖多等^[65]和美国GEOFLOW公司Rootguard系列灌水器都曾在灌水器材料中拌入氟乐灵进行探索,但是通过掺入材料的方式改良的灌水器产品释放有效成分的过程并不稳定,同时可能给土壤、环境和人类健康带来潜在风险,未能大面积推广应用。近几年,抗菌材料以及微胶囊技术的发展为灌水器材料改良提供了一个全新、有效、安全的方法。微胶囊化产品“有效缓释”的特点克服了传统材料高毒性、易挥发、易氧化的缺点,“靶向灭杀”的特性可以有效针对堵塞物质组分进行定向控制,应用前景巨大。但是,目前该技术与滴灌系统相结合仍处于探索阶段,理论与技术都急需突破。

5.5 典型劣质水源滴灌系统堵塞综合控制方法 针对黄河水滴灌系统细粒径、黏性泥沙含量高的特点,以控制细颗粒泥沙在系统内的输移过程为目标,构建了“灌水器排沙-毛管冲沙-过滤器拦沙-沉沙池沉沙”的灌水器堵塞逐级调控技术:通过流道结构优化提升灌水器自排沙能力,使更多的细颗粒通过灌水器流道排出,适宜产品可通过灌水器抗堵塞能力评估方法筛选^[26];毛管内淤积的泥沙可以通过周期性毛管冲洗冲出,系统每运行64 h左右,以0.4 m/s的流速冲洗6 min左右为宜^[66];过滤系统可选用砂石过滤器+筛网/叠片过滤器,其中砂石过滤器滤料粒径宜选择1.70~2.35 mm,过滤流速和反冲洗流速分别控制在0.014~0.021 m/s和0.007~0.022 m/s,配置的筛网过滤器适宜目数为100目,叠片过滤器则为120目^[17,23];最后确定沉沙池的处理标准,通过安装斜管和调流板可保证泥沙去除效率提高15%~20%^[80]。

针对微咸水水源矿化度高,水中含有大量的钙、镁离子等极易形成化学沉淀的特点,采用“控制水质(电导率阈值控制来减少关键组分来源)-调节运行(调控轮灌制度、灌溉频率等控制沉淀物附着过程)-配施酸肥(配施酸性肥料清除生成的堵塞物质)”相结合可以有效控制灌水器堵塞^[5]。目前确定了适宜的电导率阈值在4 dS/m以下,宜采用高频滴灌,系统工作压力应不低于0.06MPa,采用淡水与微咸水交替滴灌或者配施酸性肥料均可以有效缓解灌水器堵塞^[53]。

6 进一步研究的问题

6.1 适宜不同水源的水质预处理方法及关键参数阈值 系统研究适宜地下水、河湖库地表水、再生水、微咸水、高含沙水源等常见滴灌水源的水质深度处理工艺及配套的沉淀、过滤等水源前处理模

式,探究不同水质滴灌条件下灌水器堵塞发生特征及堵塞物质时空分布特征,确定进入滴灌系统时滴灌水源关键水质参数的有效控制阈值。

6.2 肥料-水质耦合作用下滴灌系统灌水器堵塞诱发机理及适配装备互馈选择 研究肥料-水质耦合作用下滴灌毛管及灌水器内部多物质运移特征,系统揭示水肥耦合作用条件下灌水器堵塞诱发机理与作用路径。研究肥料类型-灌溉水质-系统装备的适配机理,提出面向滴灌系统灌水均匀度控制需求的三者互馈选择技术参数阈值,实现肥料、水源与装备的有机结合。

6.3 抗堵塞灌水器产品参数化设计软件研发 耦合堵塞物质三维重构模型、颗粒-壁面碰撞动力学模型及非稳态湍流 Lattice-Boltzmann 大涡模型,建立灌水器内部固-液-气多相流动耦合模型及求解方法。探究抗堵塞灌水器流道参数组合快速适配方法,开发抗堵塞灌水器产品参数化设计软件,实现灌水器流道设计标准化、快速化、程序化。

6.4 地下滴灌系统灌水器堵塞特征识别及控制方法 研究地下滴灌系统灌水器堵塞发生规律、影响因素及其与地表滴灌系统堵塞发生的差异性,量化物理、化学、生物以及负压吸泥、根系入侵因素对灌水器堵塞的贡献程度及其耦合作用途径,辨识其中关键诱因。建立多因素影响、多类型耦合条件下堵塞物质生长动力学模型,建立地下滴灌系统灌水器堵塞控制方法。

参 考 文 献:

- [1] NAKAYAMA F S, BUCKS D A . Water quality in drip/trickle irrigation: a review[J] . Irrigation Science, 1991, 12(4): 187-192 .
- [2] PEI Y T, LI Y K, LIU Y Z, et al . Eight emitters clogging characteristics and its suitability evaluation under on-site reclaimed water drip irrigation[J] . Irrigation Science, 2014, 32(2): 141-157 .
- [3] 张钟莉莉. 微咸水滴灌系统灌水器化学堵塞机理及控制方法研究[D] . 北京: 中国农业大学, 2016 .
- [4] 冯吉. 引黄滴灌系统泥沙逐级调控机制及方法研究[D] . 北京: 中国农业大学, 2017 .
- [5] 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 .
- [6] 王迪. 不同类型灌水器对再生水滴灌施肥的适宜性及堵塞机制[D] . 北京: 中国农业大学, 2014 .
- [7] 卢泽华. 不同方式加气灌溉对温室番茄生长及产量的影响[D] . 杨凌: 西北农林科技大学, 2012 .
- [8] CAMP C R . Subsurface drip irrigation: a review[J] . Transaction of the ASAE, 1998, 41(5): 1353-1367 .
- [9] BUCKS D A, NAKAYAMA F S, GILBERT R G . Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J] . Agricultural Water Management, 1979, 2(2): 149-162 .
- [10] BOUNOUA S, TOMAS S, LABILLE J, et al . Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches[J] . Irrigation Science, 2016, 34(4): 327-331 .
- [11] NIU W Q, LIU L . Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters [J] . Irrigation Science, 2013, 31(4): 6-7 .
- [12] KANG Y H, CHEN M, WAN S Q . Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (zea mays L . Var . ceratina Kulesh) in north China plain[J] . Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1303-1309 .
- [13] 赵和锋, 李光永. 微灌水质分析与指标判定[J] . 节水灌溉, 2004(6): 4-7 .
- [14] ZHOU B, LI Y K, PEI Y T, et al . Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation[J] . Irrigation Science, 2013, 31(6): 1251-1263 .
- [15] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国: 历史、现状和未来[J] . 水利学报, 2016, 47(3): 373-381 .
- [16] PITTS D J, HARMAN D Z, SMAJSTRLA A G . Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems[J] . Agricultural and Biological Engineering, 1990, 40(1/2): 201-218 .
- [17] FORD H W, TUCKER D P H . Blockage of drip irrigation filters and emitters by iron sulfur bacterial products [J] . Hortscience, 1975, 10(1): 62-64 .
- [18] GILBERT R G, NAKAYAMA F S, BUCKS D A, et al . Trickle irrigation: predominant bacteria in treated Colora-

- do River water and biologically clogged emitters[J]. Irrigation Science, 1982, 3(2): 123-132.
- [19] Clogging test methods for emitters[S]. ISO/TC 23/SC 18/WG 5 N 4, 2003.
- [20] 王建东, 龚时宏, 李光永, 等. 低压下流道结构参数对锯齿型滴头水力性能影响的试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(1): 72-78.
- [21] Design and installation of micro-irrigation systems, EP405.1[S]. St Joseph, Mich: ASAE. 2003.
- [22] 李久生, 陈磊, 栗岩峰. 地下滴灌灌水器堵塞特性田间评估[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1272-1278.
- [23] CAPRA A, SCICOLONE B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68: 135-149.
- [24] DEHGHANISANI H, YAMAMOTO T, OULD A B, et al. The effect of chlorine on emitter clogging induced by algae and protozoa and the performance of drip irrigation[J]. Transaction of the ASAE, 2005, 48(2): 519-527.
- [25] SUBRAMNIAN K, SENTHILVEL S. Reliability analysis of trickle emitter clogging using WEIBULL distribution[J]. Agricultural Engineering Journal, 2003, 2(3): 179-190.
- [26] ZHOU B, LI Y K, SONG P, et al. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3): 181-192.
- [27] LI Y K, LIU Y Z, LI G B, et al. Surface topographic characteristics of suspending sediment in two reclaimed wastewater and its effects on the clogging in labyrinth drip irrigation emitters[J]. Irrigation Science, 2012, 30(1): 43-56.
- [28] LI Y K, ZHOU B, LIU Y Z, et al. Preliminary surface topographical characteristics of biofilms attached on drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 557-574.
- [29] 增勇, 汤光平, 李建文, 等. 工业CT技术进展及应用[J]. 无损检测, 2010, 7: 504-508.
- [30] LI G B, LI Y K, XU T W, et al. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached to the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals[J]. Irrigation Science, 2012, 30(2): 103-113.
- [31] 杜少卿, 曾文杰, 施泽, 等. 工作压力对滴灌管迷宫流道灌水器水力性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 55-60.
- [32] 栗岩峰, 李久生, 李蓓. 滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 857-865.
- [33] ZHOU B, LI Y K, SONG P, et al. A kinetic model for biofilm growth inside non-PC emitters under reclaimed water drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2016, 168: 23-34.
- [34] 薛松. 滴灌系统灌水器复合型堵塞物质形成机制及动力学模型研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [35] ZHANG J, ZHAO W H, TANG Y P, et al. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances[J]. Irrigation Science, 2011, 29(5): 351-357.
- [36] 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 1-7.
- [37] 王元, 金文, 何文博. 锯齿型微通道内流流场的微尺度粒子图像测量[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 109-113.
- [38] LI Y K, YANG P L, XU T W, et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter[J]. Irrigation Science, 2008, 26(5): 427-438.
- [39] 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 迷宫流道转角对灌水器水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 63-67.
- [40] 杜向润, 孙楠, 王蒙. 基于PIV测量技术的变曝气量下气液两相流速度场研究[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1371-1377.
- [41] 王建东, 李光永, 邱象玉, 等. 流道结构形式对滴头水力性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(S1): 100-103.
- [42] 李治勤, 马静. 迷宫灌水器水流流态试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 82-86.
- [43] LI Y K, YANG P L, LIU H L, et al. Pressure losses mechanism analyzed with pipe turbulence theory and friction coefficient prediction in labyrinth path of drip irrigation emitter[J]. Irrigation and Drainage, 2011, 60(2):

- 179-186.
- [44] 王尚锦, 刘小民, 席光, 等. 农灌用新型迷宫式滴头内流动特性分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6): 61-63.
 - [45] 孟桂祥, 张鸣远, 赵万华, 等. 滴灌滴头内流场的数值模拟及流道优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 920-924.
 - [46] 王文娥, 王福军. 迷宫式水力特性非定常数值模拟研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 332-337.
 - [47] LIU H S, LI Y K, LIU Y Z, et al. Flow characteristics in energy dissipation units of labyrinth path in the drip irrigation emitters with DPIV technology[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(1): 137-145.
 - [48] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 5084-2005, 农田灌溉水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
 - [49] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50485-2009, 微灌工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
 - [50] 甘一萍, 白宇. 污水处理厂深度处理与再生利用技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
 - [51] RAV-ACHA C, KUMMEL M, SALAMON I, et al. The effect of chemical oxidants on effluent constituents for drip irrigation[J]. Water Research, 1995, 29(1): 119-129.
 - [52] AALI KA, LIAGHAT A, DEHGHANISANI H. The effect of acidification and magnetic field on emitter clogging under saline water application[J]. Journal of Agricultural Science(Toronto), 2009, 1(1): 132-141.
 - [53] 申庚午. 引黄滴灌条件下重力式沉沙-过滤复合系统优化设计与应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
 - [54] ARBAT G, PUJOL T, PUIG-BARGUÉS J, et al. An experimental and analytical study to analyze hydraulic behavior of nozzle-type underdrains in porous media filters[J]. Agricultural Water Management, 2013, 126: 64-74.
 - [55] 宗全利, 刘焕芳, 郑铁刚, 等. 微灌用网式新型自清洗过滤器的设计与试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 78-82.
 - [56] SONG P, LI Y K, ZHOU B, et al. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 36-45.
 - [57] LI Y K, SONG P, PEI Y T, et al. Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2015, 33(3): 235-245.
 - [58] FENG J, LI Y K, WANG W N, et al. Effect of optimization forms of flow path on emitter hydraulic and anti-clogging performance in drip irrigation system[J]. Irrigation Science, 2017, doi:10.1007/s00271-017-0561-9.
 - [59] SAHIN U, TUNC T, EROGLU S. Evaluation of CaCO₃ clogging in emitters with magnetized saline waters. Desalination and Water Treatment, 2012, 40(1/3): 168-173.
 - [60] 李云开, 王克远, 王天志, 等. 利用微生物拮抗作用清除滴灌系统灌水器堵塞的方法[P]. 国家发明专利: ZL 201410019340.9, 2016.
 - [61] 王志毅, 陈勇, 王世荣. Ts系列静电离子水处理除垢棒在工业循环水中的应用[J]. 氯碱工业, 2003, 2: 43-45.
 - [62] 杨宝中, 曹猷界. 多孔渗灌管的防堵措施研究[J]. 灌溉排水, 2000, 19(2): 69-71.
 - [63] LAMM F R, JAUME P B. Simplified equations to estimate flushline diameter for subsurface drip irrigation systems[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 60(1): 185-192.
 - [64] 王荣莲, 龚时宏, 王建东, 等. 地下滴灌抗负压堵塞的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(5): 18-21.
 - [65] 于颖多, 龚时宏, 王建东, 等. 冬小麦地下滴灌氟乐灵注入制度对根系生长及作物产量影响的试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 454-459.
 - [66] HAN S Q, LI Y K, XU F P, et al. Effect of lateral flushing on emitter clogging under drip irrigation with Yellow River water and a suitable method[J]. Irrigation and Drainage, 2017, doi:10.1002/ird.2193.

Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods

LI Yunkai¹, ZHOU Bo^{1, 2}, YANG Peiling¹

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;*

2. *College of Agricultural and Life Sciences, University of Wisconsin-Madison, WI 53706, USA*)

Abstract: Drip irrigation emitter clogging issue directly affects irrigation uniformity, operating benefits and service life of the whole irrigation system, and has become one of the most worldwide challenges of the drip irrigation studying area. Especially in the subsurface drip irrigation(SDI)system, the additional negative pressure suction and root invasion effects made the emitter clogging mechanism more complicated. Besides, both water shortage and water pollution forced us to apply multiple water sources in drip irrigation system, and meanwhile the system gradually transferred from merely irrigation to multifunction (including irrigation and fertilization etc.). Using drip irrigation in high value-added perennial crops also raised higher requirements in emitter anti-clogging ability. In this paper, the studying process of drip irrigation emitter clogging issue was reviewed. The types of emitter clogging, the testing and evaluating methods, as well as emitter clogging characteristics and prediction methods were systematically summarized at first. Then, based on how to analyze the clogging substances, the coupled-inducing mechanism and continuously growing mechanism were revealed, from the aspects of growth kinetics of clogging substances and transportation of multiple substances within emitters, respectively. Thus came up with the emitter clogging controlling methods, including controlling the sources of clogging substances, improving anti-clogging ability and effectively clearing clogging substances. Finally proposed the aspects needed to be studied in the future, aiming to provide references to solving emitter clogging issue completely and enhancing its large-scale promotions.

Keywords: drip irrigation; emitter; clogging characteristics; clogging substances; mechanism; controlling