文章编号：1672 - 3317（2023）01 - 0106 - 06

再生水滴灌条件下灌水器生物堵塞的研究概况

董聪慧 [1,2]，韩启彪 [1*]，刘伟宁 [3]，李 浩 [1]，孙 浩 [1]，李 辉 [1]
（1.中国农业科学院 农田灌溉研究所/河南省节水农业重点实验室/农业农村部节水灌溉工程重点实验室，河南 新乡 453002；2.中国农业科学院 研究生院，北京 100081；3.新乡市牧野区农业农村局，河南 新乡 453002）

摘 要：滴灌是再生水灌溉中比较可靠的灌溉技术之一，能有效降低环境污染风险。再生水滴灌时灌水器易发生堵塞，进而影响滴灌系统的安全运行。因此，开展再生水滴灌条件下的灌水器堵塞研究是非常有必要的。本文在广泛搜集并分析文献的基础上，对目前国内外再生水滴灌条件下灌水器生物堵塞的研究概况进行了归纳总结。系统阐述了再生水滴灌条件下的灌水器堵塞原因，探究了生物堵塞的发生机理，总结了再生水滴灌系统灌水器防治生物堵塞的措施。最后，探讨了未来发展趋势。作为灌水器堵塞的主要类型之一，生物堵塞可以通过加氯、调节流速和滴灌频率等方式缓解，具体措施还应与实际情况相结合。

关 键 词：滴灌；再生水；灌水器；堵塞
中图分类号：S49 **文献标志码**：A doi：10.13522/j.cnki.ggps.2021336 OSID：

董聪慧，韩启彪，刘伟宁，等. 再生水滴灌条件下灌水器生物堵塞的研究概况[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(1): 106-111.
DONG Conghui, HAN Qibiao, LIU Weining, et al. Biological Clogging of Emitters in Drip Irrigation Using Reclaimed Water: A Review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 106-111.

0 引 言

【研究意义】近年来，我国用水效率得到了一定提升，用水结构也在不断优化[1]，尤其是喷微灌技术的不断推广缓解了我国农业水资源紧缺的局面。然而，人多水少、水资源时空分布不均始终是我国的基本国情，水资源形势依旧严峻。再生水是指废水或雨水通过适当的处理，其水质达到一定标准，可以满足某种使用需求，进而实现有益应用的水[2]。世界范围内，利用再生水灌溉的历史由来已久，以色列[3]、美国[4-5]等国家的再生水灌溉技术起步较早、发展快速，目前居于世界前列。大力发展再生水灌溉，可实现废水的资源化利用，缓解我国水资源供需矛盾，推动灌溉农业的可持续发展。【研究进展】然而，再生水中往往含有颗粒杂质、化学离子、藻类、微生物、有机污染物等有害物质，这些组分之间会发生动态的相互作用，一定程度上增加了滴灌灌水器堵塞风险[6]。为促进再生水滴灌技术的推广和应用，再生水滴灌条件下灌水器的堵塞问题一直是滴灌技术研究者关注的重点之一，研究人员系统分析了滴灌灌水器中堵塞物质的形成机理，探寻灌水器抗堵塞的途径，希望通过技术措施避免灌水器的堵塞问题。【切入点】生物堵塞是再生水滴灌条件下灌水器堵塞的主要原因之一。【拟解决的关键问题】在此背景下，本文对再生水滴灌条件下灌水器生物堵塞的相关研究进行了系统总结，并对未来的研究进行了展望，以期进一步丰富和发展再生水滴灌技术理论，为缓解灌水器堵塞问题提供参考。

1 再生水滴灌灌水器生物堵塞机理研究

灌水器堵塞状况因灌溉水源而异。藻类和细菌的生长是使用地表水滴灌时灌水器堵塞的主要问题，藻类的有机残留物通常小到足以通过灌溉系统的过滤器，使用地表水滴灌时，化学沉淀相对较少。地下水中通常含有大量矿物质，这些矿物质往往会沉淀并形成水垢。使用浅井水滴灌时堵塞问题多与细菌有关，而化学沉淀在深井中更加常见[7]。

再生水与地表水、地下水有所区别，属于人工处理后的水。依据堵塞机制，再生水滴灌灌水器堵塞可分为物理、化学和生物堵塞 3 类[8-11]，这与其他水源条件下灌水器堵塞分类基本相同，但使用再生水进行滴灌时灌水器的堵塞程度往往会比使用其他水质更严重。

物理堵塞指的是水中悬浮颗粒造成的堵塞，再

收稿日期：2021-07-10
基金项目：中国农业科学院农业科技创新工程项目（ASTIP202102）；河南省科技攻关项目（202102110279）；中国农业科学院基本科研业务费专项院级统筹项目（Y2021YJ07，Y2022XK12）
作者简介：董聪慧（1997-），女。硕士研究生，主要从事节水灌溉技术与设备方面的研究。E-mail: Dongconghui111@163.com
通信作者：韩启彪（1984-），男。副研究员，主要从事节水灌溉技术与设备方面的研究。E-mail: hanqibiao@caas.cn

生水中带有的泥沙、塑料碎末、油污等物质均有可能造成灌水器的物理堵塞[12-13]。与地表水及地下水相比，再生水中 Mg^{2+}、Ca^{2+}等金属离子，HCO_3^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-}等盐分离子的量明显更高，这些离子之间可能会发生相互作用，生成的化学沉淀会导致灌水器堵塞[14-16]。再生水富含氮（N）、磷（P）、钾（K）等营养物质。一方面，这些可供作物生长利用的营养物质和微量元素有助于提高粮食产量[17-19]；另一方面，过量养分易形成化学沉淀，造成灌水器堵塞。生物堵塞是再生水滴灌中最常见的灌水器堵塞形式之一，主要是指再生水中的藻类、浮游动物、细菌等生物在滴灌系统中不断生长和繁殖，从而引起灌水器堵塞。生物堵塞往往与化学堵塞关系密切。有报道指出，即使水源中铁浓度较低，也会引起灌水器内细菌增殖[20-21]，在微生物的作用下，Fe^{3+}与灌溉水源中的有机质会发生结合，形成更加稳定的沉淀物，使灌水器堵塞[22]。Dosoretz 等[23]总结了 4 种再生水引起灌溉设备堵塞的机制：①悬浮固体颗粒物堵塞狭窄的流道；②当可溶性盐的浓度高于饱和产物时，化学沉淀导致结垢；③可溶性或胶体有机大分子疏水相互作用引起的吸附；④生物膜的形成和藻类的生长。由此可以看出，使用再生水作为灌溉水源时灌水器的堵塞机制比较复杂，往往牵扯到物理、化学、生物层面的协同作用。

研究表明，再生水滴灌条件下的灌水器堵塞与生物膜的形成和生长密切相关[24-25]。李云开等[26]对灌水器堵塞生物膜结构、组分变化特征进行了分析，得到了干物质量（*DW*）、磷脂脂肪酸（*PLFAs*）和胞外聚合物（*EPS*）量与灌水器堵塞程度之间的“S 形”曲线关系，得出生物膜的形成是诱发灌水器堵塞的根本原因之一。

灌水器中生物膜的形成主要受微生物附着、生长、脱落以及衰亡等过程的综合影响[27-28]。微生物随灌溉水进入毛管后，会在灌水器内形成生物膜；同时，微生物不断新陈代谢，分泌具有粘附性的 *EPS*，可吸附越来越多的微生物和固体悬浮物，导致生物膜不断生长，生物膜即使脱落仍可在灌水器流道内聚集为沉积物，导致灌水器堵塞。*EPS* 是一组广泛的聚合物，以细胞外黏液的形式释放，高度附着在细胞表面或细胞周围，这使得 *EPS* 在微生物聚集体相互作用中扮演了重要角色[29]。*EPS* 可以捕获悬浮颗粒，进而构建出稳定的三维基质结构，为微生物细胞提供稳定的环境和对各种消毒措施的抵抗力，使得生物膜一旦建立就很难被消除。

Gamri 等[30]使用人工合成废水开展了室内滴灌试验，系统装置的过滤精度为 10 μm，COD 质量浓度 200 mg/L。室内 3 种滴头生物记录试验结果表明，3 种滴头内均形成了由生物膜组成的沉淀物，与非压力补偿式滴头相比，压力补偿式滴头似乎对堵塞更为敏感，生物量的增长可能始于流速较低地区，然后逐步扩展到所有流动路径表面。生物膜的形成与水流速度呈正相关，营养物质的质量转移在生物膜的生长中起主要作用[31]。

Zhou 等[32]开展了再生水滴灌试验，采用微生物学检测方法，研究了 7 种滴头的生物膜附着特性，并分析了生物膜组分与滴头堵塞的定量关系。试验结果表明，随着再生水滴灌系统运行时间的不断增加，附着在滴头上的生物膜干质量 *DWs* 以及磷脂脂肪酸 *PLFAs* 逐渐增加，在不同时期增长速率呈“快-慢-快-慢”的趋势，滴头的相对流量（*Dra*）和均匀度（*CU*）则随着 *DWs*、*PLFAs* 的增加呈线性下降趋势，与此同时，随着细胞外多糖（*EPO*）、细胞外蛋白（*EPR*）和细胞外聚合物（*EPS*）的增加，*Dra* 和 *CU* 呈线性下降趋势。*PLFAs* 在生物膜中的多样性较低，但 *PLFAs* 量较高的生物膜堵塞程度较高。

2 再生水滴灌灌水器抗堵塞技术研究

2.1 通过改变微生物群落降低灌水器生物堵塞风险

Zhou 等[33]在北京市昌平区北七家污水处理厂进行了再生水滴灌试验。试验水源为经循环活性污泥系统（CASS）处理后的再生水，采用了 4 种非压力补偿式滴灌带和 5 种非压力补偿式圆柱状滴灌带。以生物膜中的 *PLFAs* 为灌水器内微生物群落的标志物，研究了滴灌灌水器内微生物群落的动态变化及其对堵塞过程的影响。结果表明，微生物群落在灌水器堵塞过程中起着重要作用，通过生物方法可有效地控制灌水器堵塞；假单胞菌 16∶0 是生物膜中最关键的细菌，可以利用拮抗原理找出拮抗细菌，然后得到其接种物，接种物用于再生水，则生物堵塞灌水器可在一定程度上恢复到出流状态。

2.2 再生水滴灌中加氯缓解灌水器的生物堵塞

控制微生物的生长可以有效缓解生物堵塞。氯的强氧化作用可以有效抑制微生物的生长繁殖甚至去除水中的微生物，防止生物膜的形成，从而有效减少堵塞，因此加氯被广泛用于防治灌水器的生物堵塞[34-37]，同时加氯也是控制微生物活动最经济的处理方法[38]。早在 1992 年，以色列学者 Ravina 等[39]就发现通过定期加氯处理可以确保污水滴灌系统的长期可靠运行。为了确定适宜的加氯方式，Song 等[40]采用 CASS 对再生水进行二次处理后进行滴灌试验，考察了 3 种常用灌水器的堵塞过程，并研究了灌水器堵塞物中微生物的动态变化。结果表明，生物膜组分与

滴头堵塞程度呈线性关系，抑制微生物生长是控制滴头堵塞最有效的方法之一，低浓度、长时间的加氯处理对再生水滴灌下的灌水器堵塞的控制效果最好。宋鹏等[41]在污水处理厂利用循环活性污泥法工艺，开展了再生水滴灌灌水器堵塞试验，研究了冲洗毛管、加氯、加氯结合冲洗毛管 3 种技术对灌水器抗堵塞效果的影响。结果表明加氯措施配合毛管冲洗，既能通过加氯抑制灌水器中微生物生长，又能利用毛管冲洗促进灌水器内部的堵塞物质脱落并被冲刷出灌水系统，加氯措施配合毛管冲洗是控制灌水器内部生物膜形成与防生物堵塞的有效措施。

加氯是常见的处理灌水器堵塞的方法，然而加氯处理是否能使土壤中养分不均衡从而影响作物的生长和产量，或者是否会对土壤造成污染，也是需要考虑的一个重要问题。栗岩峰[42]开展了田间滴灌试验，评估加氯对灌水器堵塞和土壤养分的影响。结果表明，再生水滴灌时，加氯可有效防止灌水器堵塞。同时加氯使植株吸氮量显著降低，进一步加剧了硝态氮在土壤表层的累积；加氯处理浓度低于 50 mg/L、频率低于 2 周 1 次时，会对作物氮素吸收产生一定的抑制作用，且不会对作物生长造成明显的不利影响。

2.3 通过调节流速减缓灌水器侧壁生物膜生长

生物膜的形成是一个动态过程，在附着、生长、分离和衰变过程中具有不同的方式，导致生物膜的表面形貌特征复杂。在最初的快速生长阶段之后，附着在再生水滴灌系统分支中的生物膜的生长逐渐达到了稳态，之后生物膜与滴灌管系统分离，然后沉积在灌水器中，从而导致灌水器堵塞。总而言之，灌水器内的水动力特性是生物堵塞的重要影响因素，不同滴头流道边界的水力特性会影响生物膜的空间结构和微生物的积累。多数研究结果表明，流体速度通过改变剪切力、浊度和营养物运输来影响生物膜的生长[43-48]。Li 等[49]和李贵兵等[50]认为流体速度和生物膜厚度之间存在单峰关系，且生物膜平均厚度与流速的关系符合指数规律。干管和分干管中的流速通常较大，生物膜生长困难；相比之下，支管管径较小，且水流速度由前到后不断减小，生物膜生长更容易从滴灌系统中脱离，当使用再生水滴灌时，应对支管的这些区域进行定期冲洗。生物膜的形成及发展过程与管径大小有关，Oliver 等[51]的研究印证了这一观点，与具有较长入口段和窄间距翅片的滴头相比，配备较短入口段和宽间距翅片的滴头具有更好的抗堵塞性能，流量较大的灌水器在系统中受到更大的剪切力，表现出更好的抗堵塞性能。

2.4 通过调节滴灌频率降低灌水器堵塞风险

滴灌频率对作物生长、土壤水分、养分和盐分的迁移过程有重要影响。一些研究证明，不同的灌溉频率会明显改变作物产量和水分利用效率（*WUE*）[52-53]。以往研究多关注灌溉频率与作物产量和品质之间的相关性，较少考虑其对滴灌系统运行性能的影响。关于不同灌溉频率对滴灌滴头堵塞程度和灌水器内部生物膜生长的影响的报道并不多见。

Zhou 等[54]以无压力补偿的柱状滴头为研究对象，开展了不同滴灌频率下灌水器堵塞试验。结果表明，滴灌频率越高，*Dra* 和 *Cu* 的波动期越短，严重堵塞和完全堵塞的滴头数量随着滴灌间隔的缩短而增加。滴头堵塞通常首先发生在侧向末端，然后向中部和首部转移。低频灌水处理下滴头堵塞发生的时间较早，但高频灌水处理下滴头的整体堵塞程度较严重，选用合适的灌溉频率对控制滴头堵塞有明显作用。

3 讨 论

围绕再生水滴灌下灌水器的生物堵塞问题，研究者们开展了广泛的研究，分析了再生水滴灌灌水器生物堵塞的发生机理，同时也总结了多种灌水器抗堵塞技术。尽管如此，目前研究尚存在较多不足。由于涉及学科交叉及试验测试费用昂贵等问题，目前对灌水器内微生物群落的研究报道不多，在未来可深入研究微生物群落变化对灌水器生物堵塞的影响，进一步引入更精密的方法，如高通量测序检测方法，对整个堵塞过程中微生物群落的变化进行更全面、更详细的分析。在研究加氯对灌水器生物堵塞的影响时，加氯技术对不同再生水处理工艺和不同类型滴头的适用性需要进一步研究，对作物产量和品质、土壤环境健康等的潜在影响和风险也需要进一步研究。在研究滴头流速对再生水滴灌系统侧壁生物膜生长和表面形貌的影响时，有必要综合运用现代分子生物学技术分析侧支生物膜内微生物群落结构，研究短、中、长期侧支生物膜内微生物群落结构的动态变化。在研究滴灌频率对再生水滴头堵塞的影响时，使用不同区域或不同处理工艺的再生水，同样的滴灌频率对滴头堵塞的影响是否相同仍有待研究，同时应进一步结合作物试验，设置更多的灌溉频率梯度，以获得更精准的再生水滴灌频率。

近年来，滴灌水肥气热集成技术得到了快速发展，滴灌施肥、滴灌加气和灌热等技术不断得到推广应用，这些滴灌集成技术对根系土壤环境的优化、作物产量品质的提高等有重要影响。如果将来再生水滴灌时运用这些集成技术，届时灌水器堵塞规律出现何种变化仍值得关注。

再生水滴灌时，灌水器堵塞严重影响着滴灌系统的安全高效运行。因此，探明灌水器堵塞机理，构建

适宜的灌水器防堵塞技术体系，对再生水滴灌技术的发展至关重要。未来建议进一步融合灌排工程学、生物学、数理统计等相关学科知识，运用现代化的测试分析方法，不断强化灌水器生物堵塞方面的研究，保障滴灌系统安全运行，促进再生水滴灌技术的发展。

4 结 论

1）再生水滴灌时，生物膜的形成是诱发灌水器堵塞的根本原因之一。生物膜的形成主要受到微生物附着、生长、脱落以及衰亡等过程的综合作用，一旦形成很难消除。

2）建议利用拮抗原理找出拮抗细菌，进而改变灌水器内微生物群落，降低灌水器生物堵塞风险。

3）加氯是常见的处理灌水器堵塞的方法，但向再生水中加氯对作物和土壤的影响需进一步研究。

4）再生水滴灌时选用合适的流速和滴灌频率可以有效降低灌水器堵塞。

参考文献：

[1] 中华人民共和国水利部. 2019 年水资源公报[R]. 2019.
Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China. 2019 Water Resources Bulletin[R]. 2019.

[2] 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/T 25499—2010,城市污水再生利用绿地灌溉水质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 25499—2010, The reuse of urban recycling water-Water quality standard for green space irrigation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[3] SHUVAL Hillel. The development of water reuse in Israel[J]. AMBIO-A Journal of the Human Environment, 1987, 16(4): 186.

[4] METCALF E I. Wastewater engineering: treatment and reuse[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.

[5] PARSONS L R, SHEIKH B, HOLDEN R, et al. Reclaimed Water as an Alternative Water Source for Crop Irrigation[C]. Ashs Conference, 2010: 1 626-1 629.

[6] HAN Siqi, LI Yunkai, ZHOU Bo, et al. An in-situ accelerated experimental testing method for drip irrigation emitter clogging with inferior water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 136-154.

[7] HAMAN D Z, PITTS D J, FORMER P. Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems[J]. Helgol änder Meeresuntersuchungen, 2011, 40(1-2): 201-218.

[8] CAPRA Antonina, SCICOLONE Baldassare. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 70(4): 355-365.

[9] CAPRA Antonina, SCICOLONE Baldassare. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(2): 135-149.

[10] 许翠平, 刘洪禄, 张书函, 等. 微灌系统堵塞的原因与防治措施探讨[J]. 中国农村水利水电, 2002(1): 40-42.
XU Cuiping, LIU Honglu, ZHANG Shuhan, et al. Discussion on causes of blocking up in micro-irrigation systems and prevention measures[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002(1): 40-42.

[11] 薛英文, 杨开, 李白红, 等. 中水微灌系统生物堵塞特性探讨[J]. 中国农村水利水电, 2007(7): 36-39.
XUE Yingwen, YANG Kai, LI Baihong, et al. Discussion on the biological clogging of micro-irrigation system using reclaimed water[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(7): 36-39.

[12] WESTARP Stefanie Von, CHIENG Sietan, SCHREIER Hans. A comparison between low-cost drip irrigation, conventional drip irrigation and hand watering in Nepal.[J]. Agricultural Water Management, 2004, 64: 143-160.

[13] YAN Dazhuang, BAI Zhihui, ROWAN, Mike. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater[J]. Elsevier, 2009, 21(6): 834-841.

[14] 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(4): 1 202-1 206.

[15] SHATANAWI Muhammad, FAYYAD Manar. Effect of Khitbet As-Samra treated effluent on the quality of irrigation water in the Central Jordan Vally[J]. Water Research, 1996, 30(12): 2 915-2 920.

[16] LIU Haijun, HUANG Guanhua. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 745-756.

[17] 焦志华, 黄占斌, 李勇, 等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 319-323.
JIAO Zhihua, HUANG Zhanbin, LI Yong, et al. The effect of reclaimed water irrigation on soil performance and the microorganism[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(2): 319-323.

[18] 裴亮, 刘荣豪, 薛铸, 等. 再生水滴灌作物生育期内土壤中氮素动态变化规律研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 4.
PEI Liang, LIU Ronghao, XUE Zhu, et al. Study on dynamic variation law of nitrogen in soil during growth period of crop under reclaimed water drip-irrigation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(10): 4.

[19] 王怡, 郭晓瑜, 赵超. 营养物质和藻类在再生水制取及景观水体补给中的变化[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(1): 105-110.
WANG Yi, GUO Xiaoyu, ZHAO Chao. Changes of nutrient and algae in the production of reclaimed water and the supply of landscape water[J]. Journal of Xi’an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(1): 105-110.

[20] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(4): 187-192.

[21] CARARO Denis Cesar, BOTREL Tarlei Arriel, HILLS David J, et al. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(2): 251-257.

[22] GOUIDER Mbarka, BOUZID Jalel, SAYADI Sami, et al. Impact of orthophosphate addition on biofilm development in drinking water distribution systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167: 1 198-1 202.

[23] DOSORETZ Carlos, TARCHITZKY Jorge, KATZ Ilan, et al. Development and effects of a fouling layer in distribution and irrigation systems applying treated wastewater effluents[M]. Blackwell Publishing, Oxford, 2011, 328-350.

[24] ADIN Avner, SACKS Mollie. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1991, 117(6): 813-826.

[25] CAPRA Antonina, SCICOLONE Baldassare. Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal wastewater. Irrigation and Drainage, 2005, 54: 71-79.

[26] 李云开, 宋鹏, 周博. 再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 98-107.
LI Yunkai, SONG Peng, ZHOU Bo. Microbiology mechanism and

controlling methods for emitter clogging in the reclaimed water drip irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2013, 29(15): 98-107.

[27] 李贵兵，任树梅，杨培岭，等. 再生水条件下灌水器内生物膜生长对流量的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 33-38.
LI Guibing, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Effects of growth of biofilm to emitters flow in emitter of reclaimed wastewater irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 33-38.

[28] SAGI Gidi. Adi dripper resistance to clogging with use of effluent water-a case study[J]. International Water and Irrigation, 2006, 26(2): 42-43.

[29] 谭煜，付丽亚，周鉴，等. 胞外聚合物(EPS)对污水处理影响的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(2): 307-313.
TAN Yu, FU Liya, ZHOU Jian, et al. Research progress of the effects of extracellular polymeric substances (EPS) on wastewater treatment system[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(2): 307-313.

[30] GAMRI Souha, SORIC Audrey, TOMAS Séverine, et al. Biofilm development in micro-irrigation emitters for wastewater reuse[J]. Irrigation Science, 2014, 32(1): 77-85.

[31] LEHTOLA M J, LAXANDER M, MIETTINEN I T, et al. The effects of changing water flow velocity on the formation of biofilms and water quality in pilot distribution system consisting of copper or polyethylene pipes[J]. Water Research, 2006, 40: 2 151-2 160.

[32] ZHOU Bo, LI Yunkai, PEI Yiting, et al. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2013, 31: 1 251-1 263.

[33] 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.

[34] RAV-ACHA Chaim, KUMMEL M L, SALAMON I, et al. The effect of chemical oxidants on effluent constituents for drip irrigation[J]. Water Research, 1995, 29(1): 119-129.

[35] DEHGHANISANIJ Hossein, YAMAMOTO Tahei, OULDAHMAD B, et al. The effect of chlorine on emitter clogging induced by algae and protozoa and the performance of drip irrigation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2005, 48(2): 519-527.

[36] COELHO Rubens Duarte, RESENDE Renata Sousa. Biological clogging of Netafim's drippers and recovering process through chlorination impact treatment[C]. Sacramento, 1998.

[37] MIGLIACCIO Kati White, BOMAN Brian, CLARK Gary. Treating irrigation systems with chlorine[M]. Circular Florida Cooperative Extension Service, 1992.

[38] ENGLISH S.D. Filtration and water treatment physical and chemical solutions in irrigation water treatment[M]. South Africa Irrigation, 2001.

[39] RAVINA I, PAZ E, SOFER Z, et al. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater[J]. Irrigation Science, 1992, 13(3): 129-139.

[40] 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.

[41] 宋鹏，李云开，李久生，等. 加氯及毛管冲洗控制再生水滴灌系统灌水器堵塞[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 80-86.
SONG Peng, LI Yunkai, LI Jiusheng, et al. Chlorination with lateral flushing controling drip irrigation emitter clogging using reclaimed water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 80-86.

[42] 栗岩峰，李久生. 再生水加氯对滴灌系统堵塞及番茄产量与氮素吸收的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 18-24.
LI Yanfeng, LI Jiusheng. Effect of chlorination on yield and nitrogen uptake of tomato and emitter clogging in a drip irrigation system with sewage effluent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(2): 18-24.

[43] GOUIDER Mbarka, BOUZID Jalel, SAYADI Sami, et al. Impact of orthophosphate addition on biofilm development in drinking water distribution systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167: 1 198-1 202.

[44] MANUEL C M, NUNES O C, MELO L F. Dynamics of drinking water biofilm in flow non-flow conditions[J]. Water Research, 2007, 41: 551-562.

[45] SIMPSON D R. Biofilm processes in biologically active carbon water purification[J]. Water Research, 2008, 42: 2 839-2 848.

[46] CLOETE Thomas Eugene, WESTAARD D, VANVUUREN Stefanus Johannes. Dynamic response of biofilm to pipe surface and fluid velocity[J]. Water Science&Technology, 2003, 47(5): 57-59.

[47] CHANG Hongder Ted, RITTMANN Bruce Edward, AMAR D, et al. Biofilm detachment mechanisms in a liquid-fluidized bed[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1991, 38(5): 499-506.

[48] HORN Harald, REIFF Helmut, MORGENROTH Eberhard. Simulation of growth and detachment in biofilm systems under defined hydrodynamic conditions[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2010, 81(5): 607-617.

[49] LI Guibing, LI Yunkai, XU Tingwu. 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: 103-113.

[50] 李贵兵，任树梅，许廷武，等. 流速对再生水滴灌系统毛管内生物膜表面特征的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 36-41,63.
LI Guibing, REN Shume, XU Tingwu, et al. Effects of flow velocity to surface topographic characteristics of biofilm on lateral pipes of reclaimed wastewater irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 36-41, 63.

[51] OLIVERMD Moinul Hosain, HEWA Guna Alankarage, PEZZANITI David. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 133(1): 12-23.

[52] 林涛，郭仁松，徐海江,等. 滴灌频率对南疆棉田水分蒸散特征及WUE的影响[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(7): 1 224-1 229.
LIN Tao, GUO Rensong, XU Haijiang, et al. The impact of irrigation frequency on the characters of evapotranspiration and WUE which use plastic film under drip irrigation in Southern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(7): 1 224-1 229.

[53] 蒋桂英，刘建国，魏建军，等. 灌溉频率对滴灌小麦土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 38-42.
JIANG Guiying, LIU Jianguo, WEI Jianjun, et al. Effects of irrigation frequency on soil water distribution and water use efficiency in wheat field under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 38-42.

[54] ZHOU Bo, LI Yunkai, LIU Yaoze, et al. Effect of drip irrigation frequency on emitter clogging using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2015, 33(3): 221-234.

Biological Clogging of Emitters in Drip Irrigation Using Reclaimed Water: A Review

DONG Conghui[1,2], HAN Qibiao[1*], LIU Weining[3], LI Hao[1], SUN Hao[1], LI Hui[1]

(1. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Henan Province/Key Laboratory of Water-saving Irrigation Engineering, Ministry of Agriculture, Xinxiang 453002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Xinxiang Muye District Agriculture and Rural Bureau, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Drip irrigation has been increasingly used not only for watering cash crops but also for stable crops in water-scarcity regions. One common problem in drip irrigation is emitter clogging, especially when using reclaimed water which is rich in nutrients and microbes. This paper reviews the recent development in biological clogging of the emitters, including its cause and mitigation. It is based on literature review of the extensive publications over the past decades. We review the current research situation both nationally and internationally and outline the cause of the clogging when using reclaimed water for irrigation, especially the underlying mechanisms. We also review the measures for anti-clogging the emitters. From these, we discuss the potential development in this area, including remediation of biological clogging using chlorination, adjusting flow rate and drip irrigation frequency, and the applications of these specific measures to different regions and situations.

Key words: drip irrigation; reclaimed water; emitter; clogging

责任编辑：韩 洋

（上接第 105 页）

Analyzing Static Spray Characteristics of Variable Spray System of Centrifugal Nozzle

GUO Yijian[1], ZHU Xingye[1*], TONG Lindan[3], WEI Qiao[2], WANG Xinjian[1]

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Jiangsu Runguo Agricultural Development Co., Ltd., Zhenjiang 212013, China;

3. Quality Inspection Center for Pump Products in Zhejiang Province, Wenling 317599, China)

Abstract:【Objective】This paper is to investigate experimentally the static spray characteristics of variable spray systems of centrifugal nozzles. 【Method】 A centrifugal nozzle variable spray test system was constructed by using a diaphragm pump, a high-precision turbine flowmeter, a solenoid valve and a centrifugal nozzle. Its static spray characteristics were studied for the nozzle flow rate in the range from 1.5 L/min to 13 000 r/min. For each nozzle flow rate, we measured the water droplet sizes and deposition distribution of the droplets using water-sensitive paper and droplet collection devices, respectively. 【Result】With the increase in centrifugal nozzle flow rate, the size of droplets decreased. The deposition amount of fog droplets in the 0.5 m proximal to nozzle decreased first and then increased showing a double-peak patten, with the deposition amount increased in the second peak more than in the first peak. With the increase in the centrifugal nozzle flow rate, the peak value on the left side of the distribution center of the droplet deposition decreased, and the peak value on the left side skewed towards the droplet distribution center. The peak value on the right side remained unchanged, while the peak value on the right side moves away from the droplet distribution center.【Conclusion】The rotating speed of the centrifugal nozzle has a significant influence on sizes and deposition distribution of the water droplets. Reasonably controlling the droplet size to improve the uniformity of the droplet deposition distribution is a key to improving pesticide utilization and reducing its leaching to the environment.

Key words: centrifugal nozzle; variable rate application; pulse width modulation

责任编辑：韩 洋