DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.007

再生水条件下灌水器内生物膜生长对流量的影响*

李贵兵[1]　任树梅[1]　杨培岭[1]　许廷武[2]　李云开[1]　闫大壮[1]
(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学国际学院, 北京 100083)

【摘要】 选用生物泳动床、生物滤池两种污水处理工艺下的再生水进行滴灌试验,研究灌水器内生物膜的生长情况。结果表明:灌水器内的生物膜经历附着期、生长期和成熟期,在成熟期达到动态平衡状态;灌水器进水口处的生物膜附着快、生长速度快,生物膜最厚。脱落的生物膜沉积于流道内或出水口,体现流量的变化。灌水器的平均流量变化落后于生物膜的生长变化;当生物膜到达成熟期时,生物膜反复脱落生长,是灌水器堵塞的高风险期,表现为灌水器的平均流量持续下降。系统运行 184 h 后,可采用加酸、加氯等措施冲洗滴灌灌水器。

关键词: 灌水器　滴灌　堵塞　生物膜　再生水
中图分类号: X172; S277.9⁺5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2012)03-0033-06

Effects of Growth of Biofilm to Emitters Flow in Emitter of Reclaimed Wastewater Irrigation

Li Guibing[1]　Ren Shumei[1]　Yang Peiling[1]　Xu Tingwu[2]　Li Yunkai[1]　Yan Dazhuang[1]
(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *International College Beijing*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract

Wastewater irrigation test under biological swimming bed and biological filter was done to study biofilm growth situation in emitters. Results showed that biofilm growth experienced three periods of attachment period, growth period and maturity period, and biofilm was at a dynamic equilibrium state in maturity period. Biofilm was attached fast, growth fast and was the thickest on the inlet of emitters. Detached biofilm deposited on the inside flow or the outlet, which was embodied on the flow changes. The average flow changes of emitter lagged growth change of biofilom. When biofilm reached maturity period, it was detached repeatedly to grow, and this was high-risk period of emitter clogging when the average flow of emitter was declining. After 184 h, acid and chlorine can be added to flush emitter.

Key words　Emitter, Drip irrigation, Clogging, Biofilm, Reclaimed water

引言

再生水滴灌是水资源高效利用最有效的灌溉方式之一,但再生水中含有大量的微生物、悬浮物、有机物和无机物等,极易使灌水器因堵塞而失效。目前国内外研究已发现再生水滴灌系统灌水器堵塞与生物膜有着密切关系[1~7],虽然有关生物膜的研究已经受到了水污染控制等众多领域的关注[8~11],但灌溉系统中生物膜方面的研究却鲜见报道。再生水中含有的有机物、营养物质等为微生物的生长、繁殖提供了充足的物质基础。生物膜的形成过程是微生物附着、生长、脱落以及衰亡等过程综合作用的结果;而影响微生物在介质表面形成生物膜的因素很多。流体流动的动力学特性、水中营养物质浓度、消毒剂的浓度、水中悬浮菌的数量、水温、附着介质材质等均会对生物膜生长产生影响[9,11~14],其中流体

收稿日期: 2011-03-14　修回日期: 2011-05-13
* 国家自然科学基金资助项目(50779068)和长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0657)
作者简介: 李贵兵,工程师,主要从事水利工程规划设计与节水灌溉研究,E-mail: liguibing@163.com
通讯作者: 任树梅,教授,主要从事灌溉排水理论与技术研究,E-mail: renshumei@126.com

流动的动力学特性是影响最为显著的因素之一。灌水器内流体动力特性复杂,因此生物膜的生长、脱落更为复杂。灌水器内的生物膜及沉积物是附着生长,还是来自于滴灌毛管附生生物膜的脱落,灌水器内部生物膜如何生长,以及在滴灌运行过程中灌水器如何响应生物膜的生长等问题相关研究报道目前还很少见。

本文采用生物泳动床、生物滤池两种污水处理工艺条件下的再生水,进行室外再生水滴灌试验,研究再生水滴灌灌水器内生物膜生长及其对流道尺寸变化的响应效应,分析灌水器内生物膜生长及其与灌水器平均流量的关系,以期为再生水滴灌系统堵塞机理的解释及调控模式的建立提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 再生水

试验地点在北京雁西湖污水处理厂,主要处理农村和宾馆等生活污水。试验所用的再生水为该厂的生物滤池和生物泳动床两种工艺的出水。生物滤池(BAF)是以过滤为主体的生化处理工艺,主要依靠生物填料上的生物膜去除污染物。生物泳动床工艺(FBR)是把高性能的亲水性聚酯纤维作为微生物填料,利用生物载体随水流产生的泳动效应,提高生物膜与污水的接触频率并优化微生物细菌落,从而提高污水处理的能力与稳定性。根据国家环境保护部主编的《水和废水监测分析方法》对两种再生水水质参数进行测试,表 1 为两种再生水的水质测量参数。

表 1 生物泳动床和生物滤池工艺的再生水水质

Tab.1 Water quality parameters of FBR and BAF

水质参数	生物泳动床	生物滤池
COD 值/mg·L^{-1}	33	50
SS 质量浓度/mg·L^{-1}	25	12.5
NH_3-N 质量浓度/mg·L^{-1}	0.8	0.33
NO_2-N 质量浓度/mg·L^{-1}	1	0.3
NO_3-N 质量浓度/mg·L^{-1}	2	0.5
TP 质量浓度/mg·L^{-1}	2.18	1.91
溶解氧质量浓度/mg·L^{-1}	1.21(26.3℃)	3.97(26.2℃)
电离度/μS·cm^{-1}	505(23℃)	471(23℃)
pH 值	7.31	7.26
TSS 质量浓度/mg·L^{-1}	78	24
钙质量浓度/mg·L^{-1}	65.8	68.7
镁质量浓度/mg·L^{-1}	6.93	10.9
铁质量浓度/mg·L^{-1}	0.41	0.15
TN 质量浓度/mg·L^{-1}	7.06	7.02
锰质量浓度/mg·L^{-1}	0.11	0.01

1.1.2 灌水器

灌水管(带)参数如表 2 所示,灌水器压力为 100 kPa,水温为 20°。

表 2 滴灌管(带)参数

Tab.2 Basic parameters of drip irrigation emitters

参数	滴灌带		滴灌管	
	E1	E2	E3	E4
流量/L·h^{-1}	2.30	3.00	2.50	3.20
灌水器间距/cm	30	30	30	30
流道类型	宽齿型	锯齿型	圆柱齿型	圆柱圆弧型
流道长度/mm	121.72	6.15	26.4	22.8
流道宽度/mm	0.87	0.52	1.32	0.90
流道深度/mm	0.65	0.84	0.94	1.12

1.2 试验设计与测试方法

试验采用自行研制的 2 套恒压测试平台,主要由压力罐(设计压力为 1.0 MPa)、120 目的网式过滤器、0 ~ 0.25 MPa 的压力表等组成。每套平台上分别安装被测 2 种滴灌管和 2 种滴灌带,保证滴灌管(带)进水口和末端在同一水平,能照射到阳光。运行时,常观察压力表读数,保证读数为 0.1 MPa。图 1 为试验运行期间的水温和气温变化。

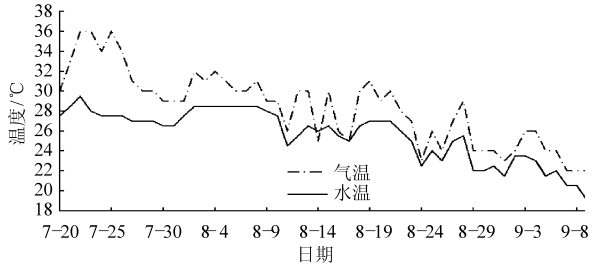

图 1 运行温度情况

Fig.1 Water temperature and air temperature during the experiment

系统运行后,每 4 d 测一次灌水器流量,每次测 3 min,取灌水器的平均流量作为计算流量;监测个别灌水器。整个试验期间共取样 7 次,分别在系统运行第 6(48 h)、16(128 h)、19(152 h)、23(184 h)、31(248 h)、46(368 h)、54 天(432 h)取样。采用 JNOEC XS - 2121 型显微镜测量生物膜的厚度,220 V/60 W 的高亮度卤素灯作为入射照明光源。

所用水泵参数为:流量 $Q = 10\ m^3/h$,扬程 $H = 20\ m$,转速 $n = 2\ 900\ r/min$。

2 结果与分析

2.1 灌水器内生物膜生长曲线

图 2、3 所示为两种再生水灌溉条件下的灌水器内进水口和流道前部、中部、末端的生物膜生长过程。再生水含有丰富的细菌等微生物,以及有机物和微小固体颗粒物质。有机物质为微生物的生长、

繁殖提供营养物质；固体颗粒物质为微生物提供附着场所，以形成微生物团聚体。固体颗粒物质镶嵌在微生物团聚体内，形成生物膜的骨架。因此微生物会附着于灌水器内壁，吸附固体颗粒物质、微生物团聚体等，形成生物膜。从图 2、3 中可以看出：生物膜的生长都经历了附着期、生长期、成熟期；生物膜的生长都出现了波动。这可以解释为生物膜在流道内的生长需要细菌等微生物的吸附为基础条件，进行微生物的累积，使生物膜厚度增大；灌水器内的尺寸改变，流道内的水力条件也改变，这有利于生物膜的生长，使生物膜急剧增厚。当生物膜厚度达到一定时，水力条件不利于生物膜的累积增厚，生物膜不断脱落；同时也在不断生长，生物膜达到成熟期，出现动态平衡。进水口生物膜的厚度达到 20 μm，是灌水器内最厚的部位，这可解释为进水口处的生物膜附着快，生物膜生长快，其厚度大。进水口处流速低于流道内，湍动能较大，且液流流向变化最大，生物膜等物质易附着在进水口处，所以改善灌水器的进水口处流动状态和结构等，能有效延长灌水器的使用寿命。颗粒物质等易碰撞附着生物膜表面，生物膜生长快；流速低，水力剪切力较小，生物膜不易脱落，所以生物膜的累积厚度较大。流道内的生物

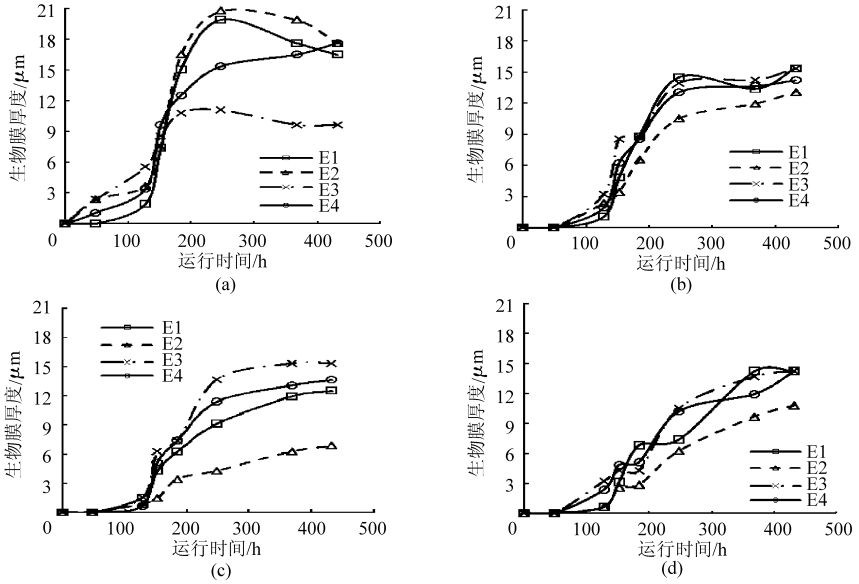

图 2　FBR 灌水器内生物膜生长曲线

Fig. 2　Growth curves of biofilm in emitter with FBR

（a）进水口　（b）流道前部　（c）流道中部　（d）流道末端

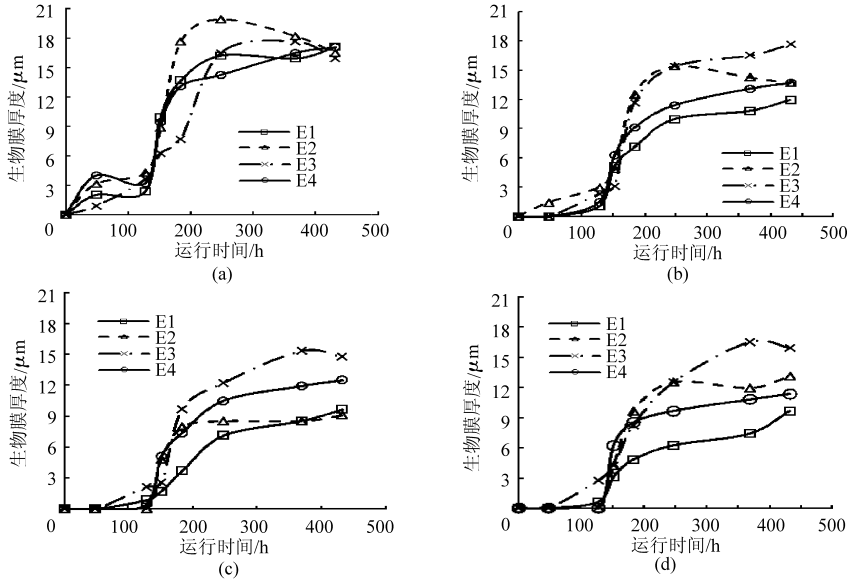

图 3　BAF 灌水器流道内生物膜生长曲线

Fig. 3　Growth curves of biofilm in emitter with BAF

（a）进水口　（b）流道前部　（c）流道中部　（d）流道末端

膜生长慢;其厚度波动大;脱落频率大,这与灌水器自动清洗功能有关。流道内水力剪切力大;流道内设置各种结构具有自动清洗功能,生物膜更易脱落;生物膜累积厚度小,这有利于灌水器的抗堵塞性能。在 4 种灌水器中,锯齿形灌水器的进水口附着生物膜最厚,而在流道的其他部位,生物膜的厚度不突出,这可能是锯齿形灌水器流道短,更有利于灌水器自动清洗。流道短有利于抗堵塞,但是锯齿形灌水器的进水口不利于抗堵塞。流道断面面积大、流道较长,生物膜易在流道的中部、末端沉积,使生物膜厚度较大。FBR 的生物膜生长曲线波动较大,有利于灌水器的抗堵塞性能。

2.2 生物膜生长对灌水器平均流量的影响

图 4、5 所示为两种再生水灌溉的灌水器平均流量与生物膜生长的关系。生物膜在灌水器流道内生长,其厚度直接影响灌水器流道结构与尺寸;脱落的生物膜直接影响灌水器的流量。从图 4、5 中可以看出:灌水器平均流量的波动是由生物膜生长过程的波动引起的;灌水器平均流量的波动落后于生物膜生长曲线的波动。这可以解释为生物膜的波动,主要由于生物膜脱落的频率大、脱落的生物膜较多;脱落的生物膜随水流流到灌水器缓冲区沉积,缩小灌水器出水口,灌水器的流量下降。

3 讨论

灌水器内部尺寸较小,结构复杂;再生水中含有丰富的微生物、固体悬浮颗粒物质和有机物等极易在滴灌系统内形成微生物团聚体的悬浮,易堵塞灌水器。这些团聚体可在过滤器之后形成,所以通过过滤措施并不能有效防治灌水器堵塞。固体颗粒物质是灌水器堵塞物质中的重要成分,而再生水中含有丰富的固体悬浮颗粒物质,是微生物等附着体;再生水中还含有大量的氮、磷等有机物质,为微生物生长提供营养物质;固体悬浮颗粒物质与微生物和有机物等发生物理、化学及生物方面的反应,形成悬浮的生物膜团聚体或附着于介质表面的生物膜。灌水器内的水动力特性很复杂,而流体的动力特性对生物膜的形成、生长等影响较大,这使再生水滴灌系统中生物膜的生长及滴灌系统的堵塞过程和机理变得极为复杂,严重增加了滴灌系统堵塞的风险。Ollos 也认为水体中的微生物营养物质、管材、细菌等影响生物膜的形成,且随着流速增加,营养物质丰富,生物膜内的细菌数量增加[15];生物膜的生长主要由生物膜的累积和脱落决定;高流速为微生物生长和繁殖提供充足的营养物质,从而产生更多的胞外多聚物粘性物质,粘附更多的悬浮固体颗粒物质和生物膜团聚体,使生物膜增厚。Markku 等研究发现流速增加,生物膜的生长速率增加[16]。但流速增加,水力剪切力增加,生物膜更易出现脱落,Cloete 等发现流速为 3 ~ 4 m/s 的生物膜易脱离介质表面[17]。在自然环境条件下,微生物、固体颗粒物质、絮状物质经过不断沉积,粘附于固体表面的物质称之为生物膜[18],则在再生水中生物膜会附着于滴灌系统,而且附着于固体颗粒物质的生物膜团聚体也会随水流

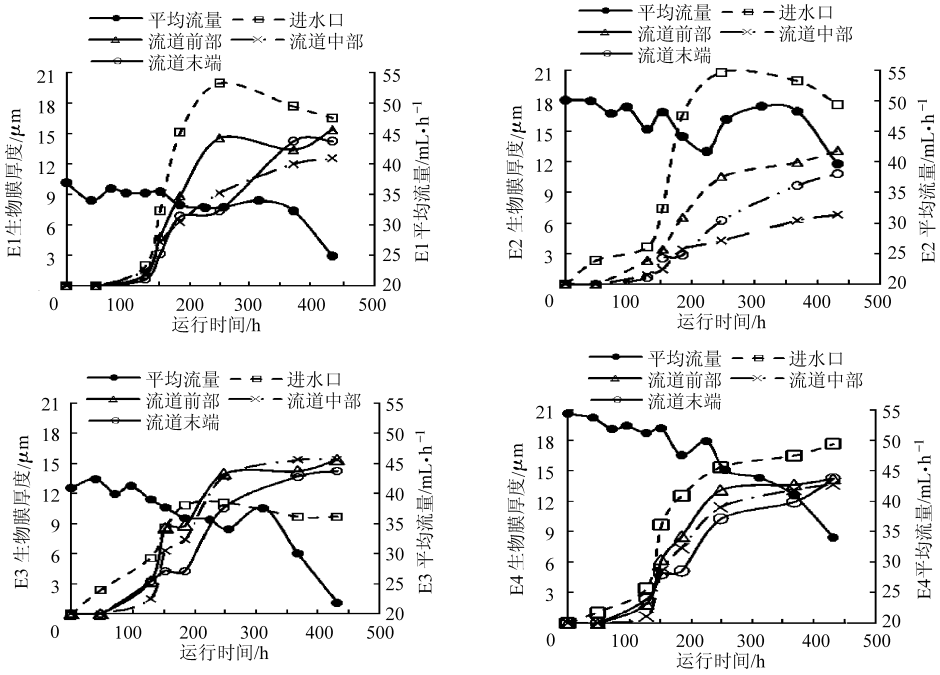

图 4 FBR 灌水器平均流量与生物膜生长曲线

Fig. 4 Growth curves of biofilm in emitter and average volume of emitter with FBR

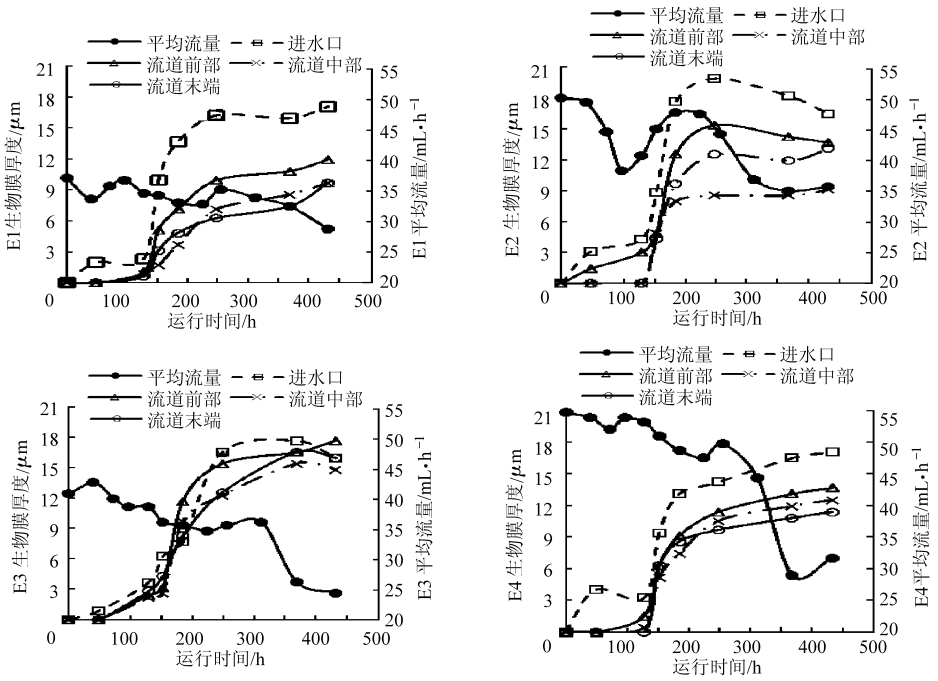

图 5　BAF 灌水器平均流量与生物膜生长曲线

Fig. 5　Growth curves of biofilm in emitter and average volume of emitter with BAF

进入灌水器内附着、沉积和生长。本文通过 FBR 和 BAF 两种工艺再生水条件滴灌试验，发现灌水器内生物膜生长经历了附着期、生长期和成熟期的波动过程，到达成熟期时，生物膜生长与脱落达到动态平衡。结合灌水器平均流量变化，发现灌水器平均流量的波动落后于生物膜生长的波动；到达成熟期时，生物膜生长曲线不断波动，但灌水器平均流量出现拐点，并直线下降。在生长期，生物膜获得的营养充分，微生物繁殖、生长活跃，产生的胞外多聚物分泌物多，生物膜能吸附更多的生物膜团聚体和固体悬浮颗粒物质，生物膜快速增厚。随着生物膜增厚，流体水动力的影响，以及分泌物质的填充，生物膜空隙减小，生物膜系统内的营养物质传输困难，微生物的代谢粘性分泌物质减少；同时还有部分微生物死亡，生物膜系统的粘附力下降。特别在生物膜增厚后，水力剪切力等增加，生物膜更易脱落，脱落的生物膜沉积到下游或随水流流出灌水器。在成熟期尤为突出。由此出现生物膜脱落、生长的反复动态过程，此过程直接体现在灌水器流量的波动和持续的波动下降方面，并最终导致灌水器堵塞。

综上所述，在灌水器流道内近壁面区流速在 0.06 ~ 0.5 m/s 之间，水流运动受复杂边界的连续扰动而呈紊流[5]，而且流道内都有能提高剪切力的自动冲洗结构。在进水口处灌水器进水口的流速常在 0.4 ~ 0.6 m/s 之间，而出水口缓冲区流速常在 0.02 ~ 0.1 m/s 范围内，因而生物膜更易在此沉积和生长而难以脱落[19]。有研究表明滴灌灌水器内部沉积物常易先发生在灌水器进、出口部位，而逐渐延伸到整个流道[20~21]，这与试验一致：生物膜易在灌水器进水口附着生长，生长速度快；脱落的生物膜主要沉积在灌水器出水口。生物膜在成熟期脱落，所以滴灌系统运行 184 h 后，可采用加酸、反冲洗等措施加速生物膜的脱落，使生物膜流出流道；流量下降 20% 时，也可采取相应的措施；而在系统运行 128 ~ 184 h 时，可适当加酸，减缓生物膜的生长速度，以延长滴灌系统的使用寿命，提高灌溉效益。

4　结论

（1）FBR、BAF 的再生水滴灌灌水器内生物膜的形成经历了附着期、生长期、成熟期的过程。在成熟期，生物膜反复生长、脱落，达到动态平衡状态。脱落的生物膜随水流沉积于流道、出水口或流出灌水器，所以在成熟期，灌水器处于高风险期。因此系统运行 184 h 后，可采用加酸、反冲洗等措施清洗灌水器，延长滴灌系统的使用寿命。

（2）再生水滴灌灌水器内进水口处的生物膜易附着、生长快、厚度大、脱落多，是诱发灌水器堵塞的主要原因。灌水器流道端部的生物膜生长变化落后于流道前部和进水口处的生物膜变化；生物膜脱落后，随水流流出灌水器，或沉积于流道内和出水口。

（3）再生水滴灌灌水器的平均流量变化落后于生物膜的生长变化，主要是灌水器内生物膜脱落后，沉积于灌水器的出水口，影响灌水器流量。

参 考 文 献

1 Puig-Bargues J, Arbat G, Barragan J, et al. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents [J]. Agricultural Water Management, 2005,77(1~3):249~262.

2 Adin A, Sacks M. Dripper clogging factor in wastewater irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(6): 813~826.

3 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.

4 Ravina E, Sofer Z, Marcu A, et al. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent [J]. Agricultural Water Management, 1997, 33(2): 127~137.

5 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.

6 Liu H J, Huang G H. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 745~756.

7 Capra A, Scicolone B. Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal wastewater [J]. Irrigation and Drainage, 2005, 54(Supp. 1): 71~79.

8 Bishop P L. The role of biofilms in water reclamation and reuse [J]. Water Science & Technology, 2007, 55(1~2): 19~26.

9 Murphy H M, Payne S J, Gagnon G A. Sequential UV-and chlorine-based disinfection to mitigate Escherichia coli in drinking water biofilms [J]. Water Research, 2008, 42(8~9): 2 083~2 092.

10 Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fracture surface of metals [J]. Nature, 1984,308(19): 721~723.

11 秦松岩. 德国奥德河水中生物膜形态及其生物多样性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
Qin Songyan. Study on morphology and biodiversity of biofilm of River Oder [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

12 Manuel C M, Nunes O C, Melo L F. Dynamics of drinking water biofilm in flow/non-flow conditions [J]. Water Research, 2007, 41(3): 551~562.

13 Gouidera M, Bouzida J, Sayadi S, et al. Impact of orthophosphate addition on biofilm development in drinking water distribution systems [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1~3): 1 198~1 202.

14 Simpson R D. Biofilm processes in biologically active carbon water purification [J]. Water Research, 2008, 42(12): 2 839~2 848.

15 Ollos P J. Effects of drinking water biodegradability and disinfectant residual on bacterial regrowth [D]. Ontario Candan: University of Waterloo, 1998.

16 Markku J L, Michaela L, Ilkka 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(11): 2 151~2 160.

17 Cloete T E, Westaard D, van S J. Dynamic response of biofilm to pipe surface and fluid velocity [J]. Water Science Technology, 2003, 47(5): 57~59.

18 李今. 人工湿地与城市水体中生物膜特性及功能研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2005.
Li Jin. Studies on characteristics and function of biofilms in the constructed wetland and urban water bodies [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

19 张志新. 滴灌工程规划设计原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.

20 Cararo D C, Botrel T A, Hills D J, et al. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006,22(2): 251~257. (in Chinese)

21 Rowan M,Mancl K,Tuovinen O V H. Clogging incidence of drip irrigation emitters distributing effluents of differing levels of treatment[C] // Mankin K R. On-Site Wastewater Treatment X, Conference Proceedings/ASAE. Publication Number 701P0104, 2004: 84~91.