DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.09.007

技术总结

供水管材对管壁生物膜特性和水质稳定性的影响

张心悦[1,2]， 周克梅[3]， 刘 煜[3]， 林 涛[1,2]
（1. 河海大学 环境学院，江苏 南京 210098；2. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室，江苏 南京 210098；3. 南京水务集团有限公司，江苏 南京 210036）

摘 要： 选取聚乙烯(PE)管、钢管和球墨铸铁管3种常见供水管材进行试验，采用改进式生物膜环形反应器培养管壁生物膜，考察不同管材对管壁生物膜生物量和群落组成特征的影响；开展余氯衰减试验，探究不同初始氯浓度下，管材对主体水余氯变化和有机物特性的影响。结果表明：3种管道内壁生物量大小排序为球墨铸铁管>钢管>PE管。管材对微生物群落组成特征存在着显著影响，PE管壁中放线菌纲占比高达64.44%，钢管和球墨铸铁管壁中α-变形菌纲和γ-变形菌纲为优势菌纲。管材和初始氯浓度对于管道水质稳定性具有重要作用，当初始氯浓度为0.5 mg/L时，各管材余氯衰减均过快，10 h内消耗完全；当初始氯浓度为1.0 mg/L时，PE管主体水中亲水性有机碳(CDOC)含量显著上升；当初始氯浓度为2.0 mg/L时，球墨铸铁管中余氯衰减速率是其他两种管材的2~3倍，且主体水中CDOC含量远高于PE管和钢管。

关键词： 供水管材； 生物膜特性； 余氯衰减； 有机物特性； 群落组成
中图分类号： TU991 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-4602(2022)09-0044-08

Effect of Water Supply Pipe Material on Biofilm Characteristics and Water Quality Stability

ZHANG Xin-yue[1,2]， ZHOU Ke-mei[3]， LIU Yu[3]， LIN Tao[1,2]
(1. *College of Environment*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes <Ministry of Education>*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 3. *Nanjing Water Group Co. Ltd.*, *Nanjing* 210036, *China*)

Abstract: Biofilm attached on pipe wall was cultivated in a modified biofilm annular reactor to investigate the effects of different pipe materials (polyethylene, steel and ductile iron) on biomass and microbial community composition of the biofilm. Residual chlorine decay test was carried out to explore the influence of pipe material on the change of residual chlorine in bulk water and the characteristics of organic matter at different initial chlorine concentrations. The descending order of biomass in the inner wall of three kinds of pipes was ductile iron, steel and polyethylene. Pipe material had a significant effect on microbial community composition. The relative abundance of *Actinobacteria* accounted for 64.44% in polyethylene pipe wall, and *Alphaproteobacteria* and *Gammaproteobacteria* were the dominant classes in steel pipe and ductile iron pipe walls. Pipe material and initial chlorine concentration played an important role in the stability of pipe water quality. When the initial chlorine concentration was 0.5 mg/L, the

基金项目：国家自然科学基金资助面上项目(51978238)；住房和城乡建设部研究开发项目(2020-K-036)
通信作者：林涛 E-mail：hit_lintao@163.com

residual chlorine in each pipe decayed rapidly and was completely consumed within 10 h. When the initial chlorine concentration was 1.0 mg/L, the concentration of hydrophilic organic carbon (CDOC) in the bulk water of polyethylene pipe increased significantly. When the initial chlorine concentration was 2.0 mg/L, the decay rate of residual chlorine in ductile iron pipe was 2-3 times that of the other two kinds of pipe, and the concentration of CDOC in bulk water was much higher than that of polyethylene pipe and steel pipe.

Key words: water supply pipe material; biofilm characteristics; residual chlorine decay; organic matter characteristics; community composition

在饮用水的贫营养环境中,管壁黏附生长的微生物比悬浮生长的微生物具有更大的生存优势,约有95%的细菌以管壁生物膜的形式生长。管壁作为生物膜形成的载体,为微生物的生长繁殖提供了场所,管材对供水管网中生物膜生长和繁殖的作用不可忽视,不同管材上生物膜生长特性有很大差异[1-2]。管网余氯浓度是保障输配水质安全的关键指标,余氯稳定性与主体水的物理、化学、微生物特性以及管材紧密相关[3-5]。微生物是影响余氯稳定性的重要因素之一,微生物与消毒剂反应,会加快余氯的衰减速率[6]。饮用水输配系统中的许多水质问题在本质上是由管壁生物膜引起的[7],包括微生物脱落、硝化作用、生物腐蚀和机会致病微生物的增殖等。可见,管壁生物膜与主体水中消毒剂和各种化学组分发生的各种动态反应,严重影响输配水管网中水质的稳定性。因此,笔者从余氯浓度和管材两大关键要素出发,基于改进式生物膜环形反应器(BAR),考察了不同管材对管壁生物膜特性的影响;同时从余氯衰减规律和主体水有机物特性两个重要方面,研究不同余氯浓度下管材对主体水水质稳定性的影响,以期对城镇输配水管网的运行管理提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验基于改进式生物膜环形反应器(BAR)开展管壁生物膜的培养和取样,如图1所示。针对聚乙烯(PE)管、钢管和球墨铸铁管分别构建3组BAR反应器同时运行,用于后续试验的平行取样和测定。每个装置中心是由调速电机驱动的转鼓,转鼓周边固定20个长方形管材挂片,每个挂片长为15 cm、宽为2 cm,装置内筒有效容积为7.85 L。装置顶部及底部加盖黑色有机玻璃盖,筒身采用锡箔纸包裹紧实,以模拟供水管道无光且基本密闭的状态。依托调速电机控制转鼓旋转速度,以模拟实际供水管道中的水力条件,通过蠕动泵调整进水流量以模拟实际供水管道中的水力停留时间。

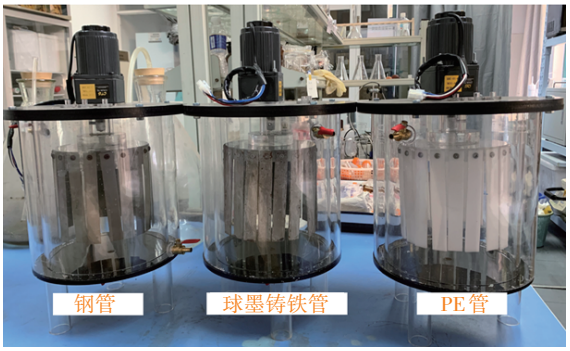


图1 改进式生物膜环形反应器

Fig.1 Improved biofilm annular reactor

以江苏省某自来水厂的出厂水进行管壁生物膜培养,BAR装置通水运行周期共6个月。试验期间每个月均对生物膜的生物量进行测定,待生物膜成熟稳定后进行生物多样性检测;同时开展水质稳定性试验,包括余氯衰减试验和有机物特性分析。

1.2 试验方法

1.2.1 生物膜分析检测

试验通过测定生物膜挥发性干质量(VS)的变化,探究不同管材的管壁生物膜生长规律。生物膜VS含量与其内部活性生物量密切相关。试验采用灭菌棉签擦拭管材挂片内外表面(表面积共60 cm^2)取样,采用EDTA法分离出胞外聚合物(EPS)提取液。剩余溶液通过0.45 μm纤维膜过滤,于100 ℃烘干至恒质量,并于马福炉内高温(550 ℃)灼烧至恒质量,通过计算质量差值得到单位面积管材挂片的生物膜挥发性干质量(mg/cm^2),每种管材均采用3份平行挂片样品并取均值作为最终结果。另外,

试验切割 1 cm^2左右的管材挂片并固定生物膜后，置于扫描电镜（SEM，型号 Hitachi-S4800）样品台进行观察，探究生物膜的表观形貌特征。

基于 16S rRNA 高通量测序法检测球墨铸铁管、钢管和 PE 管 3 种不同管壁生物膜上微生物的群落结构组成，每种管材均采用 3 份平行挂片样品进行高通量测序。生物膜细胞内 DNA 的提取采用美国 Omega 公司 E. Z. N. A Mag-Bind Soil 系列 DNA 提取试剂盒。基因测序平台为 Illumina MiSeq PE300，测序数据用 Quantitative Insights into Microbial Ecology（QIIME）软件包进行处理。上述试验中所用管材挂片采样结束后，将其归置原位保证装置平稳运行，但需对其进行标记不再取样，以免对后期试验造成影响。

1.2.2　有机物含量与分布测定

试验设置了 3 种初始氯浓度（0.5、1.0 和 2.0 mg/L），探究不同初始氯浓度下管材对水质稳定性的影响。待余氯衰减试验结束后，针对主体水进行有机物特性分析，试验通过液相有机碳（LC-OCD）对水中有机物含量与分布进行评估，主要针对 CDOC（未被 SEC 色谱柱吸附流出的部分，通常指亲水性有机碳）进行分析。根据分子质量（MW）大小和化学性质将 CDOC 分为：MW>20 000 u 的生物聚合物（BP）、MW>1 000 u 的腐殖质（HS）、MW 在 300～500 u 之间的腐殖质降解产物（BB）、MW≤350 u 的小分子中性物质（NEU，大多是弱极性或非极性的亲水性化合物，包括醇类、醛类、酮类以及少量 MW<350 u 的氨基酸类物质和有机酸）。

2　结果与讨论

2.1　不同管材的管壁生物膜特性差异

2.1.1　管壁生物膜生长规律

3 种管材运行 6 个月周期内的生物量（以 VS 计）变化规律如图 2 所示。可以看出，随着时间的延长，不同的生物膜样本呈现出相似的生长规律：运行初期，微生物生长处于迟缓期，生物量增加较少；随后微生物快速生长繁殖，VS 含量显著增加；运行后期进入稳定期，部分细菌出现死亡，生物量总数维持稳定。生物膜生长达到稳定后不同基质材料的生物膜上的生物量不尽相同。装置运行末期，PE 管挂片的生物量为 6.68 mg/cm^2，钢管挂片为 9.66 mg/cm^2，球墨铸铁管挂片呈现最高的生物量，为 12.56 mg/cm^2。运行周期内，不同时段的生物量大小排序均为球墨铸铁管>钢管>PE 管。

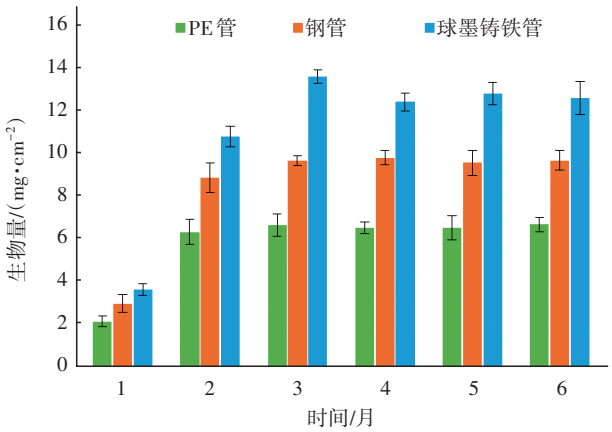


图 2　不同管材管壁生物膜的生物量变化

Fig.2　Variation of biofilm biomass with different pipe materials

采用 SEM 观察成熟生物膜表面的三维形貌特征及其交联程度，如图 3 所示（放大倍数分别为 3 000 倍和 10 000 倍）。

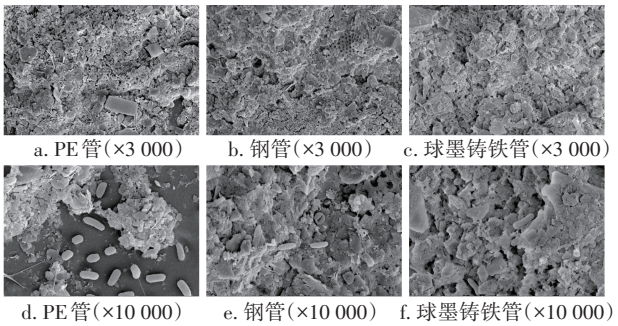


图 3　不同管材生物膜扫描电镜照片

Fig.3　SEM images of biofilm samples from different pipe materials

由图 3 可以看出，PE 管材内壁比较光滑，附着于管壁生长的生物膜较薄，微生物分布较为分散，可以观察到部分杆细菌。相比之下，钢管和球墨铸铁管表面的生物密度较大，生长较为均匀，生物膜厚度增加，生物量明显更多，具有更为复杂、发达的生物膜构造，丰富的菌胶团促使生物膜之间的交联程度更加突出。最为突出的是，球墨铸铁管壁表面凹凸不平，沉积物较多，管壁腐蚀严重，为微生物生长和抵抗外界威胁提供了良好的场所，管壁表面微生物团聚现象最为严重。可见，电镜扫描结果与生物量检测结果具有一致性，表明微生物更容易在球墨铸铁管表面生长和繁殖，在光滑的 PE 管材表面生

物量最少。

2.1.2　管壁生物膜群落结构特征

针对PE管、钢管、球墨铸铁管的管壁生物膜，开展高通量测序进行生物多样性分析。3种管材管壁生物膜不同水平上的物种组成如图4所示。

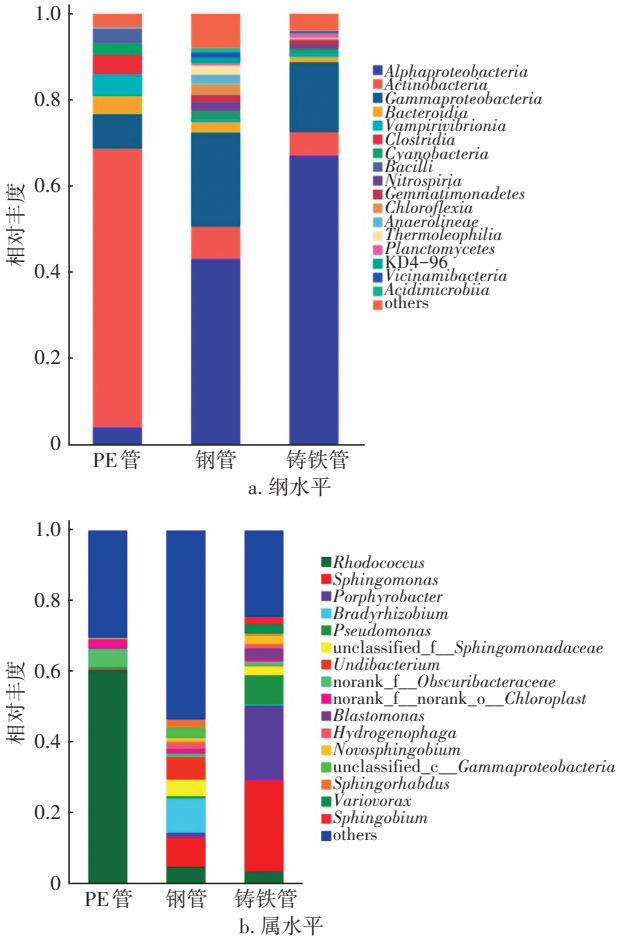


图4　不同管材管壁生物膜群落结构组成（纲水平和属水平）

Fig.4　Bacterial community composition with different pipe materials at class level and genus level

纲水平上，对于PE管壁上的生物膜，放线菌纲（*Actinobacteria*，64.44%）是最优势菌纲，其他优势菌纲包括γ-变形菌纲（*Gammaproteobacteria*，7.95%）、*Vampirivibrionia*（5.04%）、梭菌纲（*Clostridia*，4.50%）、α-变形菌纲（*Alphaproteobacteria*，4.37%）、拟杆菌纲（*Bacteroidia*，4.20%）等。就钢管管壁生物膜的微生物群落组成而言，α-变形菌纲（43.34%）和γ-变形菌纲（21.72%）占据主导地位，放线菌纲（7.43%）也占据一定优势地位。在球墨铸铁管壁生物膜中，同样以α-变形菌纲（67.24%）和γ-变形菌纲（16.10%）为主要优势菌种。

多数研究表明，在加氯的供水管网中α-变形菌纲和γ-变形菌纲为优势菌群[8]。α-变形菌纲是贫营养种群，可以在余氯存在的贫营养条件下生存。γ-变形菌纲通常生长于生物膜内层，被称为饮用水生物膜的“先锋”，不易受外部消毒剂的刺激。球墨铸铁管和钢管管壁生物膜的主导优势菌纲类似，但物种相对丰度分布有所不同；而PE管壁生物膜的优势物种与另外两种管材存在显著区别。Learbuch等[9]的研究表明，相比其他供水管材，只有塑料管材（PE和PVC）的管壁生物膜中发现了放线菌纲，放线菌纲在PE管壁的绝对优势地位可能与塑料管材的特殊性密切相关。

从属水平上进一步分析，PE管壁生物膜中红球菌属（*Rhodococcus*）是绝对优势菌属，占比高达60.45%，红球菌在系统发育和分解代谢方面具有多样性，并且具有很强的底物适应性和有机溶剂耐受性[10-12]。红球菌属在饮用水系统中的绝对优势地位并不常见，本研究中的这一发现值得对红球菌属的生长特性进行探究。对于钢管管壁生物膜，慢生根瘤菌（*Bradyrhizobium*，9.71%）、鞘氨醇单胞菌属（*Sphingomonas*，8.44%）、*Undibacterium*（6.59%）处于优势地位。对于球墨铸铁管，鞘氨醇单胞菌属和紫杆菌属（*Porphyrobacter*）为优势菌属，占比分别为25.79%和21.18%，两种菌属隶属于α-变形菌纲。γ-变形菌纲的假单胞菌属（*Pseudomonas*，8.30%）也占据优势地位，假单胞菌属是常见的耐氯菌属。特别地，ANOSIM相似性分析（OTU水平）显示，不同管材间的群落组成差异显著（R=0.972 8，P=0.004<0.05），表明管材对管壁生物膜的微生物群落组成存在显著影响。对比发现，PE管壁生物膜的物种组成单一，不利于生物膜的稳定生长，相比之下，钢管和球墨铸铁管为微生物创建了良好的生长繁殖环境，生物膜更具有物种多样性。

2.2　管材对余氯衰减变化的影响

在输配水管网中，余氯会与主体水中的有机物质等发生反应而衰减，此部分为主体水衰减，主体水余氯衰减系数用k_b表示。同时，余氯也会与管壁上的沉淀物、生物膜等发生反应而衰减，此部分为管壁衰减，管壁余氯衰减系数用k_w表示。主体水衰减和管壁衰减共同构成了管网水中余氯的总体衰减，即总余氯衰减，总余氯衰减系数用k表示。管壁

余氯衰减系数k_w可由总余氯衰减系数k和主体水余氯衰减系数k_b计算得出。

针对3种管材分别进行总余氯衰减试验和主体水余氯衰减试验。一方面，采用BAR装置模拟管道出厂水的运行，并测定水中余氯浓度变化，得到总余氯衰减系数k；另一方面，采用无管材挂片影响下的静态烧杯试验，得到主体水余氯衰减系数k_b。k_b和k_w均采用一级衰减模型拟合试验参数。根据自来水厂的常规出厂水余氯浓度，初始氯浓度分别设置为0.5、1.0、2.0 mg/L。

2.2.1　总余氯衰减

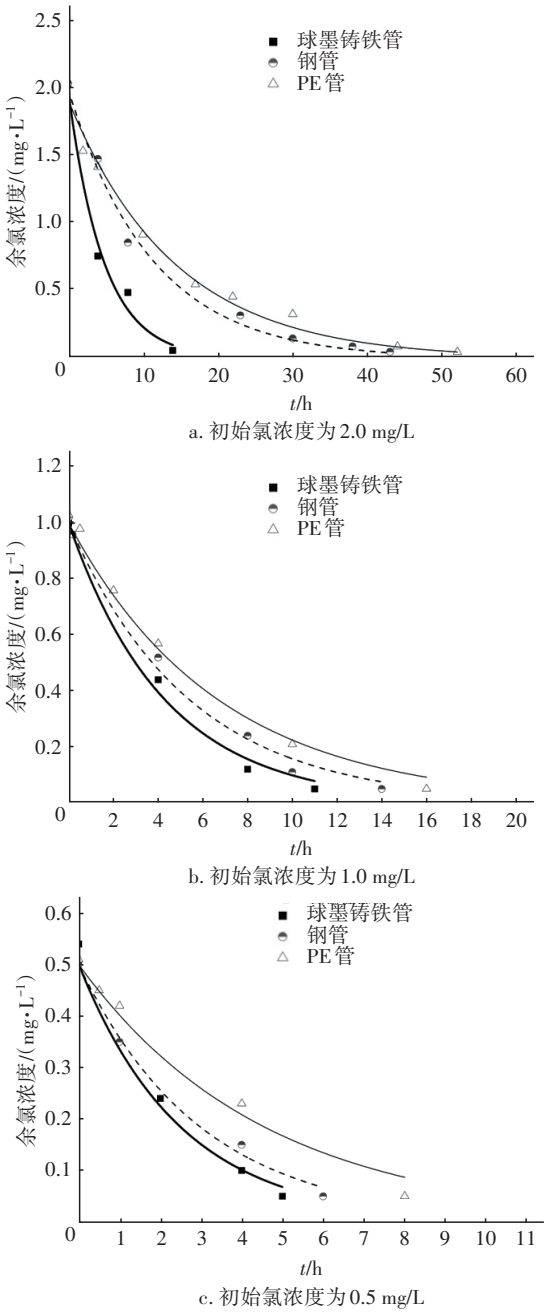
不同初始氯浓度下，各管材总余氯衰减曲线拟合结果如表1所示。拟合结果表明，对于同一种管材，总余氯衰减速率与余氯初始浓度呈负相关关系。有研究认为，余氯浓度过低时余氯会优先与水中还原性较强的物质迅速发生反应，导致余氯衰减较快；余氯浓度较高时，余氯在水中同时发生两种不同速率的反应，包括快速反应和慢速反应，因此速率比低初始氯浓度时更慢。

表1　3种管材在不同初始氯浓度下的总余氯衰减

Tab.1　Total residual chlorine decay of different pipe materials at different initial chlorine concentrations

初始氯浓度/(mg·L^{-1})	管材	总衰减系数k/h^{-1}	拟合公式	R^2
2.0	球墨铸铁管	0.206	$y = 2.02e^{-0.206t}$	0.987 4
	钢管	0.089	$y = 2.04e^{-0.089t}$	0.992 6
	PE管	0.071	$y = 1.97e^{-0.071t}$	0.991 4
1.0	球墨铸铁管	0.231	$y = 1.05e^{-0.231t}$	0.984 9
	钢管	0.184	$y = 1.02e^{-0.184t}$	0.993 1
	PE管	0.150	$y = 1.03e^{-0.150t}$	0.981 8
0.5	球墨铸铁管	0.398	$y = 0.54e^{-0.398t}$	0.985 2
	钢管	0.334	$y = 0.50e^{-0.334t}$	0.994 1
	PE管	0.218	$y = 0.51e^{-0.218t}$	0.984 2

在1.0 mg/L和0.5 mg/L的低初始氯浓度下，3种管材中余氯衰减十分迅速（如图5所示），衰减到0.05 mg/L的时间（$t_{0.05}$）分别为11、14、16 h和5、6、8 h，球墨铸铁管衰减最快，钢管次之，PE管最慢。但是3种管材余氯衰减速率变化范围不超过30%，即在初始氯浓度<1.0 mg/L的低余氯浓度下，不同管壁生物膜之间的余氯衰减差异并不明显。当初始氯浓度<0.5 mg/L时，3种管材余氯衰减速率都较快，均在10 h内消耗完全，不利于管网水中余氯的稳定性。



a. 初始氯浓度为2.0 mg/L

b. 初始氯浓度为1.0 mg/L

c. 初始氯浓度为0.5 mg/L

图5　3种管材在不同初始氯浓度下的总余氯衰减拟合曲线

Fig.5　Total residual chlorine decay fitting curve of different pipe materials at different initial chlorine concentrations

在2.0 mg/L的高初始氯浓度下，球墨铸铁管的$t_{0.05}$（14 h）远远低于钢管（43 h）和PE管（52 h），且余氯衰减速率是后者的2~3倍，钢管和PE管余氯衰减系数较为接近。2.1节研究结果表明，球墨铸铁管壁表面粗糙，腐蚀程度高，生物量大，主体水中余氯会与表面锈蚀物发生反应，丰富的微生物及可能产生的溶解性微生物产物也会导致余氯的反应消耗。

同时，铸铁管的管壁较为粗糙，较大的反应接触面积使得铸铁管壁与主体水中余氯反应充分，致使余氯衰减速率较快。

2.2.2　主体水及管壁余氯衰减

在本试验中，通过实际试验测得总余氯衰减系数k和主体水余氯衰减系数k_b的值[13]，由公式(1)、(2)推算得到管壁余氯衰减系数k_w，并计算出管壁余氯衰减系数占比k_w:k，具体结果见表2。

$$k = k_b + \frac{k_w k_f}{r_h\left(k_w + k_f\right)} \tag{1}$$

$$k_f = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.33} \frac{D}{d} \tag{2}$$

式中：k_b为主体水余氯衰减系数，h^{-1}；k_w为管壁余氯衰减系数，h^{-1}；k_f为传质系数，公式(1)中单位为m/h，公式(2)中单位为m/d；r_h为水力半径，m；d为管径，m；D为扩散系数，经验值为0.1×10^{-3} m^2/d。Re为雷诺数，$Re = vd/\nu$，其中，v为流速，m/s；ν为运动黏度，20 ℃时为1.01×10^{-6} m^2/s，即0.09 m^2/d。Sc为施密特数，$Sc = \nu/D$。

表2　不同初始氯浓度下各管材管壁余氯衰减系数

Tab.2　Residual chlorine decay coefficient of different pipe materials at different initial chlorine concentrations

初始氯浓度/(mg·L⁻¹)	管材	总衰减系数k/h^{-1}	主体水衰减系数k_b/h^{-1}	管壁衰减系数k_w/h^{-1}	k_w:k/%
2.0	铸铁管	0.206	0.061	0.007 7	3.74
	钢管	0.089	0.061	0.001 2	1.35
	PE管	0.071	0.061	0.000 4	0.56
1.0	铸铁管	0.231	0.106	0.006 3	2.73
	钢管	0.184	0.106	0.003 5	1.90
	PE管	0.150	0.106	0.001 9	1.27
0.5	铸铁管	0.398	0.180	0.013 8	3.47
	钢管	0.334	0.180	0.008 3	2.49
	PE管	0.218	0.180	0.001 6	0.73

在无管壁生物膜影响下，初始氯浓度分别为0.5、1.0、2.0 mg/L的主体水余氯衰减系数分别为0.180、0.106、0.061 h^{-1}，可知主体水余氯衰减系数k_b随初始氯浓度的变化规律与总余氯衰减系数一致，即衰减速率均随着初始余氯浓度的增大而减小。在不同初始氯浓度下，球墨铸铁管、钢管、PE管的管壁衰减系数均表现为依次减小，球墨铸铁管的管壁衰减系数明显较高，进一步表明球墨铸铁管管壁加速了余氯的消耗和衰减，这与总余氯衰减系数的变化规律一致。

2.3　不同管材下的主体水有机物特性

在余氯衰减过程中，水中的有机物会与余氯以及管壁生物膜发生复杂的反应导致其特性变化，对不同管材余氯衰减试验结束后的水样以及出厂水(对照组)采用液相-有机碳测定仪(LC-OCD)检测，分离水中不同分子质量(MW)和不同物化性质的有机物，对水体中溶解性有机物进行分级解析，从而明确生物膜与余氯交互作用后主体水有机质的理化性质及分子质量特性。在不同初始氯浓度下，3种管材的主体水CDOC组分分布如图6所示。

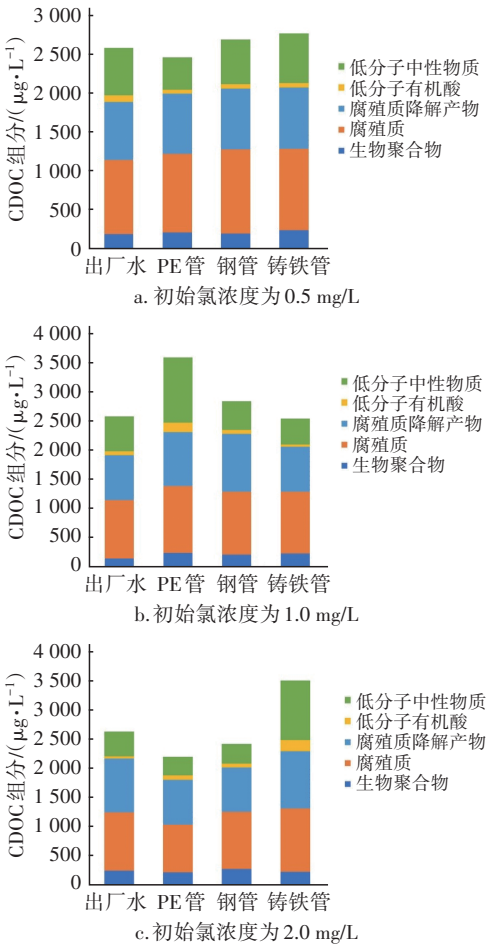


图6　不同初始氯浓度下3种管材主体水中CDOC组分

Fig.6　Abundance distribution of CDOC in bulk water of different pipe materials at different initial chlorine concentrations

有研究指出，生物聚合物主要包括多糖、蛋白质和氨基酸类物质，而多糖和蛋白质是胞外聚合物(EPS)的主要成分，因此从某种程度上来说，生物聚

合物可以表征水中EPS的含量[13]。分子质量较小的腐殖质和腐殖质降解产物是CDOC中占比最高的部分，占CDOC总量的50%~70%，腐殖质主要包含腐殖酸、富里酸和腐殖素等。

当初始氯浓度为0.5 mg/L时，3种管材主体水的有机物特性变化不显著，PE管水样中CDOC总含量轻微降低，而钢管和铸铁管表现为轻微上升趋势，可能是由于余氯浓度较低，受消毒剂刺激的管壁与主体水之间相互作用较弱，对主体水中CDOC的含量和分布影响不大。当初始氯浓度为1.0 mg/L时，3种管材的生物聚合物较无生物膜水样分别增加了56%、41%和51%，可能为余氯刺激生物膜造成的EPS脱落。与钢管和球墨铸铁管不同的是，PE管材主体水明显观察到CDOC含量显著增加，主要归结于PE管主体水中低分子中性物质(32%)和低分子有机酸(4%)的含量上升，远高于钢管和球墨铸铁管，可能与耐氯性较差的PE管壁生物膜在较高余氯作用下微生物产物的脱落和释放有关。当余氯浓度上升至2.0 mg/L时，铸铁管水样中CDOC含量最高，比PE管和钢管分别高出59%和44%，也体现在低分子有机酸和低分子中性物质的差异，这与球墨铸铁管较高的管壁衰减系数有关，表明高浓度氯刺激下，球墨铸铁管管壁生物膜分泌形成的微生物产物含量可能大于被消耗和吸收利用的有机物组分，导致主体水中CDOC的含量明显增高。不同的是，在高浓度氯刺激下的PE管和钢管中，可能受应激保护机制影响，微生物对主体水中可利用有机物进行吸收和代谢以维持生物膜生长，导致主体水中CDOC含量下降。

管壁生物膜对营养物质的吸附利用、微生物产物的脱落释放以及管壁生物膜与主体水各种化学组分的反应进程，对于主体水有机物特性的动态变化均存在着重要影响。上述结果表明，在不同余氯浓度下，不同管材对主体水有机物特性存在着差异化的影响，这与管材间生物膜群落组成特性的显著差异密切相关。

综上所述，管材和余氯浓度对管道主体水水质稳定性具有重要影响。在余氯稳定性方面，初始氯浓度为0.5 mg/L时，余氯衰减速率过快，3种管材水样中余氯均在10 h内消耗完全；初始氯浓度为2.0 mg/L时，球墨铸铁管的余氯衰减速率远大于PE管和钢管，不利于保障余氯的消毒效果。在有机物含量和分布方面，初始余氯浓度为1.0 mg/L时，PE管水样中CDOC含量显著上升；初始余氯浓度为2.0 mg/L时，PE管水样中CDOC含量最低；铸铁管水样中CDOC含量远高于其他两种管材，不利于水质安全性和稳定性的控制。

3　结论

①　不同管材管壁生物膜的生物量大小排序为球墨铸铁管>钢管>PE管。PE管的生物膜较薄，微生物分布较为稀疏分散；钢管和球墨铸铁管的生物膜生长较为均匀，微生物团聚现象明显，具有更为复杂、发达的生物膜结构。在群落结构特征方面，PE管壁生物膜中放线菌纲占比高达64.44%；钢管和球墨铸铁管中，α-变形菌纲和γ-变形菌纲为优势菌纲。管材对管壁生物膜微生物群落组成特性存在着显著影响。

②　余氯衰减试验结果表明，初始氯浓度<1.0 mg/L条件下，不同管壁生物膜之间的余氯衰减速率差异并不明显。0.5 mg/L的初始氯浓度下，余氯衰减速率较快，均在10 h内消耗完全。2.0 mg/L初始氯浓度下，球墨铸铁管水样中余氯衰减到0.05 mg/L的时间(14 h)远远低于钢管(43 h)和PE管(52 h)。

③　主体水的有机物特性分析表明，初始氯浓度为1.0 mg/L时，PE管主体水中CDOC含量显著上升；初始氯浓度为2.0 mg/L时，PE管水样中CDOC含量最低；球墨铸铁管水样中CDOC含量远高于其他两种管材。在不同余氯浓度下，不同管材对主体水有机物特性存在着差异化的影响。

参考文献：

[1] 陈停，徐叶琴，李冬平，等. 供水管网生物膜特征及对消毒副产物生成势的影响[J]. 供水技术，2019，13(1)：1-5.
CHEN Ting, XU Yeqin, LI Dongping, *et al*. Characteristics of biofilm and influence on the potential of disinfection by-products in pipe wall of water supply network [J]. Water Technology, 2019, 13(1): 1-5 (in Chinese).

[2] LI W Y, TAN Q W, ZHOU W, *et al*. Impact of substrate material and chlorine/chloramine on the composition and function of a young biofilm microbial community as revealed by high-throughput 16S rRNA sequencing[J]. Chemosphere, 2020, 242: 125310.

[3] TSVETANOVA Z G, DIMITROV D N. Biofilms and

bacteriological water quality in a domestic installation model simulating daily drinking water consumption[J]. Water Science & Technology, 2012, 12(6): 720-726.

[4] ZHANG C, LI C, ZHENG X, *et al*. Effect of pipe materials on chlorine decay, trihalomethanes formation, and bacterial communities in pilot-scale water distribution systems [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2017, 14(1): 85-94.

[5] ZHANG H, ANDREWS S A. Effects of pipe materials, orthophosphate, and flow conditions on chloramine decay and NDMA formation in modified pipe loops[J]. AQUA, 2013, 62(2): 107-119.

[6] ADHIKARI R A, SATHASIVAN A, KRISHNA K C B. Effect of biofilms grown at various chloramine residuals on chloramine decay[J]. Water Science & Technology, 2012, 12(4): 463-469.

[7] LIU S, GUNAWAN C, BARRAUD N, *et al*. Understanding, monitoring, and controlling biofilm growth in drinking water distribution systems [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(17): 8954-8976.

[8] DOUTERELO I, SHARPE R L, BOXALL J B. Influence of hydraulic regimes on bacterial community structure and composition in an experimental drinking water distribution system[J]. Water Research, 2013, 47(2): 503-516.

[9] LEARBUCH K L G, SMIDT H, VAN DER WIELEN P. Influence of pipe materials on the microbial community in unchlorinated drinking water and biofilm[J]. Water Research, 2021, 194: 116922.

[10] KIM D, CHOI K Y, YOO M, *et al*. Biotechnological potential of *Rhodococcus* biodegradative pathways [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2018, 28(7): 1037-1051.

[11] 吴金芳,张雨潇,彭仁. 红球菌的组学、遗传改造及其应用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2021. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.08036.
WU Jinfang, ZHANG Yuxiao, PENG Ren. Research advance in omics, genetic modification and application of *Rhodococcus* [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2021. DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2020.08036(in Chinese).

[12] 侍路梦,吴慧芳,王玉敏,等. 供水管网余氯衰减变化规律及模型研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(1): 52-57,62.
SHI Lumeng, WU Huifang, WANG Yumin, *et al*. Decay pattern and model of residual chlorine in water supply network [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(1): 52-57,62 (in Chinese).

[13] HUBER S A, BALZ A, ABERT M, *et al*. Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography-organic carbon detection-organic nitrogen detection (LC-OCD-OND) [J]. Water Research, 2011, 45(2): 879-885.

作者简介:张心悦(1998-),女,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:2582391069@qq.com

收稿日期:2021-07-10

修回日期:2021-08-10

(编辑:任莹莹)

尊法学法守法用法,治水管水兴水护水