

# 供水管网中微生物群落演替与水质生物稳定性关联研究

陈火斌

江西饶州建设工程有限公司 江西上饶 333199

**摘要：**供水管网中微生物群落的演替与水质生物稳定性之间存在着密切而复杂的关联。管网微生物主要分布于水相与管壁生物膜中，两者在群落结构与丰度上差异显著，其演替过程受温度、营养基质、水力条件及pH值等环境因子的共同驱动。水质生物稳定性通过AOC、HPC等指标进行评价，其高低直接反映了水体抑制微生物过量繁殖的能力。研究表明，微生物群落演替与生物稳定性高度相关：异养菌等优势种群的丰度变化与HPC值呈正相关，是生物稳定性下降的直接体现；而适度的群落多样性则通过物种间的竞争与捕食关系，有助于维持系统的稳定。此外，群落演替的模式，特别是致病菌和生物膜相关菌群的出现与增长，可作为水质二次污染风险的重要指示信号。深入理解这一关联机制，为通过调控微生物群落来提升供水管网水质生物稳定性、保障供水安全提供了科学依据。

**关键词：**供水管网；微生物群落；群落演替；生物稳定性

## 引言

城市供水管网是保障居民饮水安全的“最后一公里”，其内部复杂的生态环境直接影响着终端水质。在漫长的输送过程中，管网并非简单的物理通道，而是一个动态的微生物反应器。微生物在管壁形成生物膜，在水中悬浮生长，其群落结构随着环境变化而不断演替。这种演替不仅改变了微生物自身的生态格局，更深刻地影响着水质的生物稳定性，即水体抵抗微生物污染的能力。当生物稳定性下降时，微生物过度繁殖，可能导致水质恶化、异味产生甚至病原菌传播，构成严重的公共卫生隐患。因此，系统探究供水管网中微生物群落的演替规律，揭示其与水质生物稳定性的内在关联，对于预测和控制水质风险、保障供水安全具有重大的理论价值与紧迫的现实意义。

## 一、供水管网中微生物群落的结构与演替特征

### （一）管网水相与管壁生物膜中的微生物群落构成

供水管网中的微生物群落主要分布于水相和管壁生物膜两大区域，两者在物种组成、丰度特征以及生态功能方面均存在显著差异。水相微生物以浮游型为主，群落结构相对简单，但具备较强的动态响应能力，其优势类群主要包括异养菌（如假单胞菌属、不动杆菌属）、硝化细菌（如亚硝化单胞菌属、硝化杆菌属），同时也会含有少量真菌与原生生物。这类微生物主要依赖水体中溶解态的营养物质维持生存，其种群丰度对水质参数变化高度敏感，例如温度、pH值、氧化还原电位及有机物浓度的波动均可显著影响其数量，其浓度通常在 $10^2$ - $10^4$

CFU/mL范围内变动。

相比之下，管壁生物膜中的微生物群落结构更为复杂，呈现出典型的“多层级、高丰度、强稳定”的生态特征。生物膜以微生物分泌的胞外聚合物（EPS）为基本骨架，通过物理包埋和化学吸附作用将大量微生物聚集在一起，形成一个高度结构化的微生态系统。其优势类群除常见的异养菌外，还包括放线菌、蓝细菌以及多种微型后生动物（如轮虫、纤毛虫等）。生物膜内部微生物的丰度通常可达水相群落的10至100倍，并在此基础上形成完整且稳定的食物链营养结构——异养菌负责降解水中的有机物质，原生生物通过捕食异养菌获取能量，后生动物则进一步以原生生物为食。这种层级捕食关系不仅提高了物质与能量的利用效率，也显著增强了生物膜群落对外界环境波动的适应性及抵抗力。

### （二）影响微生物群落演替的关键环境因子

微生物群落的演替过程受到多种环境因子的综合调控，其中温度、营养基质、水力停留时间与pH值被公认为核心驱动要素。温度主要通过影响微生物的代谢活性和酶反应速率来调控演替进程，通常在20-30℃的范围内微生物活性达到最高，群落结构变化最为剧烈；当温度低于10℃时，微生物生长受到明显抑制，导致演替周期延长；而高温条件（超过35℃）则会淘汰耐热性较差的物种，使嗜热或耐热类群逐渐占据优势地位。

营养基质的种类与浓度直接决定了微生物群落的组成与发展方向。水体中生物可同化有机碳（AOC）、磷源、氨氮等关键营养物质含量的升高，会显著刺激异养

菌和硝化细菌的增殖,从而改变原有的群落优势结构;相反,在营养匮乏的条件下,那些能够适应低营养环境的寡营养菌将逐渐成为主导类群。水力停留时间则通过影响微生物与底物的接触机会和作用时长来左右演替路径,若停留时间过长(超过24小时),将大大提高微生物在管壁附着并形成生物膜的可能性,推动群落向生物膜主导的类型演替;而若停留时间过短(不足6小时),微生物难以充分生长与繁殖,群落结构会维持在相对简单和稳定的状态。pH值通过直接作用于微生物的酶活性和细胞膜稳定性来影响其生存与竞争,中性条件(pH 6.5-8.0)最有利于大多数微生物的生长,偏离此范围会形成环境选择压力,使得耐酸或耐碱的特异性类群逐渐占据优势,从而改变整体群落构成<sup>[1]</sup>。

### (三) 微生物群落结构在管网不同区段的时空变化规律

微生物群落结构在供水管网中展现出明显的时空异质性,其分布和演替随空间位置与时间推移呈现规律性变化。在空间维度上,从水厂出水口至管网末端,微生物群落结构逐步发生演变:水厂出水口附近由于消毒剂浓度较高,微生物总体丰度较低,群落以具有一定消毒剂抗性的异养菌为主;进入管网中段后,随着消毒剂浓度的逐渐衰减以及营养物质的不断积累,硝化细菌与真菌的丰度开始上升,物种多样性明显提高;到达管网末端时,消毒剂余量已不足以抑制微生物生长,生物膜大量形成,放线菌与微型后生动物等成为优势类群,群落结构趋于复杂化和稳定化。

在时间维度上,微生物群落演替表现出显著的季节性波动规律。夏季由于水温较高、营养供应相对充足,微生物代谢活跃、繁殖迅速,群落演替速度加快,异养菌和硝化细菌的丰度普遍高于其他季节;而在冬季,低温环境抑制了大多数微生物的生理活性,群落结构进入相对静止的阶段,耐冷型的寡营养菌比例有所上升。此外,短期气候事件如降雨也会对群落构成产生影响,雨水渗入可能导致管网水质参数发生波动,进而引发短暂的群落演替,例如在降雨结束后的1-2天内,异养菌数量往往会出现快速上升的现象。

## 二、水质生物稳定性的评价与影响因素

### (一) 水质生物稳定性的评价指标与方法

水质生物稳定性的评价需通过多指标协同表征,核心指标包括生物可同化有机碳(AOC)、异养菌平板计数(HPC)、胞外聚合物(EPS)含量与消毒副产物前体物含量。AOC反映水体中可被微生物利用的有机碳总量,

是评价生物稳定性的核心指标,AOC值越低,水体抑制微生物生长的能力越强,通常认为AOC < 100  $\mu\text{g/L}$ 时水质生物稳定性良好。

HPC用于表征水体中异养菌的丰度,直接反映微生物生长繁殖状态,HPC值超过 $10^4$  CFU/mL时,提示水质生物稳定性下降,存在微生物过量繁殖风险。EPS含量与生物膜形成密切相关,其升高意味着生物膜生长加速,会进一步降低水质生物稳定性。评价方法以静态培养法为主,通过模拟管网环境培养水样,监测不同时段AOC与HPC的变化,综合判断水质生物稳定性等级<sup>[2]</sup>。

### (二) 水力条件与营养基质对生物稳定性的影响

水力条件通过改变微生物与营养物质的接触状态,调控水质生物稳定性。适宜的水流速度(0.5-1.0 m/s)能增强水体扰动,减少微生物附着形成生物膜,同时促进消毒剂在管网内均匀分布,维持较高的生物稳定性;水流速度过慢(< 0.3 m/s),水体流动性差,微生物易沉降附着,营养物质在局部积累,加速微生物繁殖,导致生物稳定性下降;水流速度过快(> 1.5 m/s),会冲刷管壁生物膜,导致微生物大量释放至水相,短期内使HPC值升高,降低水质生物稳定性。

营养基质是微生物生长的物质基础,其含量直接决定水质生物稳定性。AOC与磷是限制微生物生长的关键营养因子,当AOC > 200  $\mu\text{g/L}$ 且磷含量 > 0.05 mg/L时,微生物易大量繁殖,生物稳定性显著下降;氨氮含量升高会促进硝化细菌生长,硝化过程消耗水体中的溶解氧,同时产生硝酸,改变水体pH值,间接影响生物稳定性。此外,营养基质的种类也会影响稳定性,小分子有机物(如葡萄糖、氨基酸)易被微生物利用,其含量升高对生物稳定性的破坏作用更显著。

### (三) 消毒剂余量与种类对微生物活性的调控作用

消毒剂通过抑制微生物代谢酶活性或破坏细胞结构,调控微生物活性,进而影响水质生物稳定性。管网中需维持一定的消毒剂余量,确保抑制微生物生长,通常游离氯余量应保持在0.05-0.2 mg/L,二氧化氯余量保持在0.02-0.1 mg/L。消毒剂余量不足时,对微生物的抑制作用减弱,微生物快速繁殖,生物稳定性下降;余量过高则会增加消毒副产物(如三氯甲烷)的生成风险,同时可能破坏水体中有机物结构,间接提升AOC值。

不同消毒剂对微生物活性的调控效果存在差异。游离氯对异养菌的抑制效果显著,但易受氨氮影响生成氯胺,降低消毒效率;二氧化氯杀菌谱广,对真菌与病毒的抑制效果优于游离氯,且消毒副产物生成量少,更利

于维持水质生物稳定性；紫外线消毒虽能快速杀灭微生物，但无持续消毒能力，管网末端微生物易再次滋生，需搭配其他消毒剂使用<sup>[3]</sup>。

### 三、微生物群落演替与水质生物稳定性的关联性分析

#### (一) 优势微生物种群与生物稳定性指标的响应关系

优势微生物种群的消长与水质生物稳定性指标存在显著响应关系，不同种群对稳定性的影响呈现差异化特征。异养菌属的丰度与HPC值、AOC值呈正相关，当假单胞菌属、不动杆菌属等异养菌丰度升高时，HPC值会同步上升，同时微生物代谢消耗水体中有机碳，导致AOC值下降，但这种下降并非稳定性提升，而是微生物过量繁殖的表现，长期会引发二次污染。

硝化细菌的丰度变化与氨氮、pH值密切相关，亚硝化单胞菌属与硝化杆菌属丰度升高时，氨氮含量下降，硝酸含量上升，水体pH值降低，若pH值降至6.5以下，会抑制多数微生物生长，间接提升水质生物稳定性，但过度硝化可能导致水体酸化，引发管网腐蚀。放线菌属丰度升高通常与生物膜形成相关，其代谢产生的胞外聚合物会使EPS含量上升，降低水质生物稳定性，同时可能产生异味物质，影响水质感官性状。某供水管网中段监测显示，放线菌属丰度从 $10^3$  CFU/mL升至 $10^4$  CFU/mL时，EPS含量增加50%，HPC值超标2倍，水质生物稳定性显著下降<sup>[4]</sup>。

#### (二) 群落多样性与生物稳定性的内在联系

微生物群落多样性对水质生物稳定性具有重要支撑作用，两者呈现“适度多样性最优”的关系。群落多样性较高时，物种间竞争与协同作用更均衡，能更高效地利用水体中的营养物质，避免单一物种过度繁殖，维持水质生物稳定性。例如，当群落中同时存在异养菌、硝化细菌、原生生物时，原生生物捕食异养菌，可有效控制异养菌丰度，防止HPC值超标，维持水体稳定。

若群落多样性过低，单一优势物种易占据主导地位，一旦环境条件适宜，该物种会快速繁殖，导致生物稳定性下降。如管网末端因消毒剂余量不足，若群落中仅异养菌占优，缺乏捕食性原生生物，异养菌会大量滋生，引发生物膜形成与水质恶化。但群落多样性过高也可能降低稳定性，过多物种竞争营养物质，可能导致某些功能菌群（如硝化细菌）丰度不足，无法有效降解氨氮等污染物，间接影响水质。

#### (三) 微生物群落演替对水质二次污染风险的指示作用

微生物群落演替过程中的物种组成变化，可作为水质二次污染风险的重要指示信号。当群落中致病菌（如

军团菌属、沙门氏菌属）出现且丰度升高时，提示二次污染风险显著增加，这类致病菌可能通过生物膜传播，引发居民健康隐患。某小区供水管网曾监测到军团菌属丰度达 $10^2$  CFU/mL，后续排查发现是管壁生物膜脱落导致，及时采取消毒措施后风险解除。

生物膜相关菌群（如放线菌属、蓝细菌属）的演替趋势也能指示污染风险，这类菌群丰度持续上升时，表明生物膜在加速生长，若后续水力条件发生变化（如流速突增），生物膜易脱落进入水相，导致水体浊度升高、HPC值超标。此外，群落演替速率也能反映污染风险，演替速率过快通常意味着水质参数波动剧烈，微生物群落难以适应，易出现优势种群失衡，引发二次污染<sup>[5]</sup>。

### 结语

供水管网中微生物群落的演替与水质生物稳定性的关联研究，揭示了微观生态世界与宏观供水安全之间的深刻联系。它表明，水质的变化并非孤立事件，而是管网内部微生物生态系统动态平衡的直观反映。通过监测关键微生物种群的消长和群落结构的变迁，可以像“听诊”一样，提前感知水质的潜在风险。这种基于生态学原理的认知，为供水安全管理提供了全新的视角，即从单纯依赖化学消毒，转向通过调控管网微生态环境来主动维持水质稳定。展望未来，随着分子生物学技术的发展，对管网微生物群落的认知将更加精准和深入，从而推动建立更加智能、预警性的水质安全保障体系，确保流经千家万户的水龙头里的每一滴水都更加洁净、安全。

### 参考文献

- [1] 王海珊. 组合生物技术高效净化黑臭水体方法微生物群落结构研究[D]. 云南大学, 2021.
- [2] 刘佃磊, 王律杰, 董迎迎, 等. 生物再生生命保障系统中小麦秸秆好氧生物处理及其微生物群落演替[J]. 载人航天, 2020(004): 026.
- [3] 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 等. 畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2020. DOI: 10.13227/j.hjkk.201907153.
- [4] 陈丽萍[1]; 陈青[1]; 赵辉[1]; 苏建宇[1]. 贺兰山东麓荒漠藻结皮微生物群落结构及其演替研究[J]. 生态学报, 2020(9).
- [5] 乌有娜, 王玉荣, 洋洋, 等. 酸粥发酵过程中微生物群落演替及理化特性变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(17): 6. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029627.