

给水管网中抗生素抗性基因的赋存特征与迁移转化机制

熊平

乐安县鸿顺市政工程有限公司 江西省抚州 344300

摘要: 本研究聚焦于城市给水管网系统, 系统性地探讨抗生素抗性基因在其中的赋存特征、迁移机制与转化机制。在赋存特征方面, 重点研究抗性基因在管网不同空间节点(如水源入口、用户末端及中间管段)的丰度差异与分布规律, 深入分析其与管网生物膜形成及演化的关联性, 并揭示不同类型抗性基因之间的共存模式及其潜在的影响因素。在迁移机制层面, 全面阐述管网中水流动力学过程、生物膜周期性脱落行为、颗粒物吸附效应以及管网材料特性与水力条件变化对抗性基因迁移路径与速率的影响, 辨析主要和次要迁移驱动力及其耦合作用机制。在转化机制部分, 重点探讨生物膜内部微生物之间的水平基因转移过程, 包括接合、转导和转化等途径; 分析温度、pH、余氯浓度等环境因子对抗性基因稳定性和转移效率的作用; 并研究抗性基因在复杂微生物群落中的持留特性与自然衰减动态过程。本研究的结果有望为给水管网中抗性基因的污染控制策略制定以及饮用水安全的风险管控提供坚实的理论依据和实践支持。

关键词: 给水管网; 抗生素抗性基因; 赋存特征; 迁移机制

引言

给水管网是连接水厂与用户的关键环节, 其水质安全直接关系到人体健康。随着抗生素在医疗、养殖等领域的广泛应用, 抗生素抗性基因作为新型环境污染物, 通过水源水、管网腐蚀产物等途径进入给水管网系统。抗性基因可在微生物间传递, 导致抗性微生物扩散, 若通过饮用水进入人体, 可能降低抗生素治疗效果, 威胁公共卫生安全。目前, 关于给水管网中抗性基因的研究已受到关注, 但对抗性基因赋存规律、迁移路径及转化过程的系统梳理仍需加强, 相关研究可为管网水质风险控制提供依据。

一、给水管网中抗生素抗性基因的赋存特征

1. 抗性基因的丰度与空间分布特征

给水管网中抗性基因的丰度呈现明显的空间差异, 这种差异与管网运行状态、水流路径及停留时间密切相关。从水厂出水端至用户末端, 抗性基因丰度整体呈现逐步变化趋势。水厂经过常规处理后, 出水中抗性基因丰度处于较低水平, 常见类型抗性基因检出值可控制在较低水平。但随着水流在管网中的输送, 抗性基因丰度逐渐发生变化, 在管网中端节点, 由于水流停留时间增加, 管壁微生物活动增强, 抗性基因丰度较水厂出水有所上升; 到达用户末端时, 受管网末梢水流速度减缓、

余氯消耗等因素影响, 抗性基因丰度进一步升高。此外, 不同功能区域的管网抗性基因分布也存在差异, 居民生活区管网因用水需求稳定, 水流状态相对规律, 抗性基因丰度波动较小; 而商业密集区管网因用水高峰与低谷差异显著, 水流间歇性变化, 抗性基因丰度波动幅度更大^[1]。

2. 抗性基因与管网生物膜的关联性

管网生物膜是抗性基因在给水管网中存在的重要载体, 二者之间存在紧密关联。给水管网管壁表面会逐渐形成生物膜, 由细菌、真菌以及胞外聚合物(extracellular polymeric substances)构成, 其中细菌群落主要为变形菌门、放线菌门。这些微生物群落为抗性基因提供了生存与繁殖的微环境, 生物膜内部的微生物密度较高, 为抗性基因的保留创造了条件。生物膜的存在会显著提高抗性基因的检出率与丰度, 检出种类随生物膜发育逐渐增多, 丰度随生物膜厚度增加而上升。不同管材的管壁生物膜与抗性基因的关联程度存在差异, 铸铁管因管壁粗糙度较大, 更易附着微生物形成较厚生物膜, 其生物膜中抗性基因丰度显著高于聚乙烯管与聚氯乙烯管; 而聚乙烯管与聚氯乙烯管管壁光滑, 生物膜形成速度较慢, 生物膜中抗性基因丰度相对较低。微生物在不同管壁的附着具有选择性, 细菌群落组成是影响生物膜中抗性特征的首要因素。

3. 不同抗性基因类型在管网中的共存特征

给水管网中多种类型的抗性基因常呈现共存现象,这种共存规律与抗性基因的来源及微生物携带特性相关。在给水管网中,四环素类与磺胺类抗性基因是最常见的共存组合。这一现象的主要原因是两类抗性基因常来源于同一污染源,农业面源污染中相关抗生素常被同时使用,其产生的抗性基因通过水源水进入管网后,易在微生物体内共同存在。此外,部分微生物具有携带多种抗性基因的能力,这些微生物在管网中繁殖时,会同时携带不同类型的抗性基因,进而导致抗性基因在管网中呈现共存特征。多药类抗性基因在不同管材生物膜中丰度最高且差异较大,是造成不同管材生物膜抗性基因差异的主要原因,水杆菌属、慢生根瘤菌属等高丰度宿主是其大量存在的基础。除上述组合外,喹诺酮类抗性基因也常与四环素类抗性基因共存,但共存频率相对较低,主要与微生物对不同抗性基因的携带能力差异相关^[2]。

二、给水管网中抗生素抗性基因的迁移机制

1. 管网水流对悬浮态抗性基因的输运作用

管网水流是悬浮态抗性基因在给水管网中迁移的主要驱动力,水流速度与水流状态直接影响悬浮态抗性基因的迁移范围与迁移效率。常规水流速度下,悬浮态抗性基因可随水流实现长距离迁移,从水厂出水端顺利输送至管网各节点,此时抗性基因在管网中的分布相对均匀。若水流速度过低,悬浮态抗性基因的迁移能力显著下降,在管网局部区域易发生沉积,导致该区域抗性基因浓度升高;而当水流速度过高时,水流紊动增强,悬浮态抗性基因的扩散范围扩大,可快速迁移至管网末梢,但同时也会加剧管壁生物膜的扰动,导致部分附着态抗性基因转化为悬浮态抗性基因,进一步增加悬浮态抗性基因的迁移量。此外,管网中的水流方向变化也会影响悬浮态抗性基因的迁移,在管网分支节点处,水流方向改变会导致悬浮态抗性基因出现短暂滞留,随后再随水流向不同分支管网迁移。

2. 生物膜脱落与颗粒物吸附导致的基因迁移

生物膜脱落与颗粒物吸附是给水管网中抗性基因迁移的重要途径,二者共同推动抗性基因在管网中的转移与扩散。管网生物膜在形成过程中会不断积累抗性基因,当生物膜厚度超过一定阈值或受到水流扰动时,部分生物膜会从管壁脱落,脱落的生物膜碎片携带大量抗性基因进入水体,成为悬浮态抗性基因的重要来源,随水流实现迁移。在老旧管网中,生物膜脱落现象更为频繁,

由此携带的抗性基因迁移量在管网中抗性基因总迁移量中占比可观。同时,给水管网中存在的颗粒物具有较强的吸附能力,可通过多种作用吸附水体中的抗性基因。这些吸附了抗性基因的颗粒物会随水流迁移,当水流速度降低或遇到管网局部阻力时,颗粒物可能沉积,导致抗性基因在该区域富集;而当水流速度升高时,沉积的颗粒物会再次被冲刷,继续携带抗性基因迁移^[3]。

3. 管网材料与水力条件对迁移过程的影响

管网材料与水力条件通过改变水流状态与微生物附着环境,间接影响抗性基因的迁移过程。不同管网材料的管壁特性差异显著,铸铁管管壁粗糙度较大,水流在管内流动时易形成紊流,这种紊流状态会增强对管壁生物膜的冲刷作用,促进生物膜脱落,进而增加抗性基因的迁移量;同时,粗糙的管壁也为颗粒物提供了更多附着位点,导致吸附抗性基因的颗粒物在管壁附近聚集,影响抗性基因的迁移路径。聚乙烯管与聚氯乙烯管管壁光滑,水流状态相对平稳,生物膜脱落量较少,颗粒物吸附现象也相对较弱,抗性基因的迁移过程更为稳定。在水力条件方面,水力停留时间是关键影响因素,当水力停留时间过长时,抗性基因在管网中的迁移效率显著降低,部分抗性基因会因沉积或微生物吸附而滞留;而水力停留时间短时,抗性基因可快速迁移,在管网中分布更为均匀。此外,管网中的压力变化也会影响抗性基因迁移,压力骤升时,水流速度突然增加,会加剧生物膜脱落与颗粒物冲刷,导致抗性基因迁移量短期内升高。

三、给水管网中抗生素抗性基因的转化机制

1. 管网生物膜内微生物的水平基因转移

管网生物膜内微生物的水平基因转移是抗性基因转化的核心途径,通过质粒、转座子等可移动遗传元件实现抗性基因在不同微生物间的传递。携带抗性基因的质粒可在不同细菌之间发生转移,这种转移主要发生在生物膜内部,因为生物膜内微生物密度较高,微生物细胞间接触紧密,为水平基因转移提供了良好条件。生物膜中的胞外聚合物物质能够保护可移动遗传元件,使其免受环境因素的破坏,延长其存活时长,进而推动水平基因转移的发生。在生物膜形成的初始阶段,水平基因转移的效率相对较低;随着生物膜厚度的增加,该效率逐渐提高;当生物膜达到一定厚度后,随着其老化,微生物活性降低,水平基因转移效率则逐渐下降。除质粒之外,转座子同样可以介导抗性基因的水平转移。转座子能够携带特定的抗性基因在不同球菌之间进行转移,使

原本未携带该基因的菌株获得相应的抗性。可移动遗传元件介导的基因水平转移是影响生物膜中抗性基因分布的重要因素，其中整合酶基因表现出与抗性基因更加密切的关系，在水平转移中发挥重要作用^[4]。

2. 环境因子对基因转化的影响

给水管网中的环境因子通过改变微生物活性与可移动遗传元件稳定性，影响抗性基因的转化过程，其中余氯与营养物是最主要的影响因子。余氯浓度对抗性基因转化的影响呈现双向性，低浓度余氯会轻微刺激微生物活性，促进可移动遗传元件的复制与转移，从而提高抗性基因的转化效率。但当余氯浓度过高时，会破坏微生物细胞结构，导致微生物死亡，同时降解可移动遗传元件，显著抑制抗性基因的转化。营养物的含量也会影响抗性基因转化，营养物供应充足时，微生物代谢活性高，可移动遗传元件的转移能力增强，抗性基因转化效率升高。部分区域给水管网因管道泄漏，导致周边土壤中的营养物进入管网，该区域抗性基因的转化速率较正常区域显著提高。此外，温度也会对抗性基因转化产生一定影响，在适宜温度范围内，随着温度升高，抗性基因转化效率逐渐提高，超过适宜温度后，转化效率增长趋于平缓。

3. 抗性基因在管网微生物群落中的持留与衰减

抗性基因在管网微生物群落中的持留与衰减是其转化过程的重要表现，主要受微生物存活状态与环境压力的影响。在管网生物膜中，部分微生物可进入休眠状态，这些休眠微生物虽代谢活性较低，但仍能携带抗性基因长期存活，使抗性基因在管网中实现持留。即使在余氯作用下，这些休眠微生物也能保持活性，确保抗性基因不被降解。抗性基因的衰减主要源于环境压力的作用，余氯是导致抗性基因衰减的主要因素，持续的余氯作用会破坏微生物细胞，使抗性基因释放到水体中，随后余氯进一步降解抗性基因，导致浓度降低。水厂出水后，随着水流在管网中输送，余氯浓度逐渐降低，抗性基因的衰减速率也随之减缓。此外，水体管网中营养物质的匮乏会显著加速抗性基因的衰减过程。当环境中关键营养元素如碳源、氮源或磷源的含量低于微生物生长所需的最低阈值时，微生物的正常代谢和繁殖活动会受到严重抑制。在这种情况下，部分原本携带抗性基因的菌株由于无法获取足够的能量和营养物质而逐渐死亡，

其细胞内携带的抗性基因随之被核酸酶降解，或在环境因素作用下发生断裂和失活，从而导致整个系统中抗性基因的绝对浓度显著下降。需要特别指出的是，不同种类的抗性基因往往依赖于特定类型的宿主微生物存活，这些宿主的生理状态、存活能力及在不利环境中的适应策略，都会直接调控抗性基因的持久存留或快速衰减的动态过程^[5]。

结语

抗性基因在给水管网中的赋存特征、迁移机制与转化机制具有明确规律与复杂过程。在赋存特征上，抗性基因丰度呈现空间差异，与管网生物膜紧密关联且存在类型共存现象，细菌群落组成与可移动遗传元件共同塑造其分布特征；在迁移机制方面，管网水流驱动悬浮态抗性基因输运，生物膜脱落与颗粒物吸附推动抗性基因转移，管网材料与水力条件通过改变水流状态与附着环境影响迁移过程；在转化机制上，生物膜内微生物水平基因转移实现抗性基因传递，余氯、营养物等环境因子调控转化效率，抗性基因在微生物群落中呈现持留与衰减特征。这些规律与过程揭示了给水管网中抗性基因的环境行为，为制定抗性基因污染控制策略提供理论基础。在实际管网运行中，可通过优化管网材料选择、调控水力条件、合理控制余氯浓度等方式，减少抗性基因在管网中的赋存与扩散，保障饮用水水质安全。

参考文献

- [1] 张中键. 城市垃圾填埋系统中微塑料的赋存, 去除特征及其对抗生素抗性基因的影响[D]. 华东师范大学, 2020.
- [2] 张凯, 辛蕊, 李妮家, 等. 华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素[J]. 2021. DOI: 10.13227/j.hjkk.202102127.
- [3] 刘欣雨, 张建强, 黄雯, 等. 中国土壤中抗生素赋存特征与影响因素研究进展[J]. 土壤, 2021(004): 053.
- [4] 邱旭阳. 抗生素对污泥厌氧消化系统中抗生素抗性基因赋存特征的影响[D]. 江南大学, 2022.
- [5] 宋冉冉, 国晓春, 卢少勇. 东洞庭湖表层水体中抗生素及抗性基因的赋存特征与源分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(9): 11. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.04.27.