

城市地下水污染防治研究进展

刁徐笑^{1,2},孙长虹²,陈淑峰²,何 炜²

(1.首都师范大学资源环境与旅游学院,100048; 2.北京市环境保护科学研究院,100037 北京)

摘 要 叙述了国内外城市地下水污染的形势,介绍了影响城市地下水污染的主要因素,阐述了国内外城市地下水污染防治的技术手段,包括电磁监测技术、污染物示踪技术、替代监测指标技术、可渗透反应格栅修复技术、曝气技术、化学修复技术、热处理技术以及生物修复技术等,阐明了未来城市地下水污染研究的热点方向为城市地下水有机污染,特别是加油站埋地储罐的渗漏污染等,同时,研究和开发城市地下水多级监测系统应是我国未来地下水监测技术的重要发展方向,城市地下水污染的生物修复技术将是未来地下水污染修复技术研究的重点领域。

关键词 城市 地下水 影响因素 污染防治

中图分类号 X523

文献标识码 A

文章编号 :1000-3770(2015)09-0014-005

城市地下水污染问题已在全球范围内引发持续关注。世界各地的研究者均证实快速的城市化是导致城市地下水水质恶化的因素之一^[1]。城市地下水污染会导致一系列的社会生产、生活及生态环境问题,如造成水质性缺水,严重制约城市经济发展和社会进步,影响饮用水安全,严重危害居民身心健康;破坏地下水生态环境,强烈改变地下水化学特性等^[2]。

近年来,我国对地下水资源保护的重视程度逐渐加强,2011年环保部、国土资源部与水利部正式发布《全国地下水污染防治规划(2011—2020年)》,要求到2015年初步控制地下水水质恶化趋势,2020年实现重点地区(段)地下水水质显著改善,全国地下水污染防治体系基本建成^[3-4]。政府的决心和社会的需求,为我国城市地下水污染的防治工作提供了难得的契机。

然而,国内有关城市地下水污染的研究起步较晚,技术手段和管理手段还存在不足,这在一定程度上限制了城市地下水污染防治的更快发展^[5]。国内学者针对城市地下水污染研究的综述类报道,多包含生活、工业和农业等方面^[6],还有部分学者对农村地区地下水污染的研究进行了综述,但是城市和农村的地下水污染机理有着本质上的区别,难以借鉴相关的研究理论和经验^[7]。因此,本文对城市地下水污染研究的进展进行了系统性的整理,总结了国内城市地下水污染研究的相关工作,并充分借鉴了国外城市地下水污染

防治的研究成果,以期国内广大城市地下水保护工作的研究者和政策制定者提供系统性的建议。

1 国内外城市地下水污染形势

1.1 国 外

世界上发达国家和发展中国家的城市地下水均存在污染问题。针对发达国家城市地下水污染状况一系列的研究表明,以牺牲环境为代价换取经济社会暂时性繁荣发展的模式已经对地下水环境造成了严重的影响。韩国、西班牙、英国和美国等发达国家的城市地下水污染普遍存在,且呈现出逐步加重的趋势^[8-11]。

针对发展中国家也门、津巴布韦、阿根廷、伊朗、印度和塞尔维亚等的城市地下水污染的研究显示,城市地下水的污染状况已相当严重,污染形势正在迅速加剧^[12-17]。总体看来,国外城市地下水污染状况较为严重,城市地下水的污染类型多为工业废水、生活污水等的渗入造成的地下水水质有机和无机污染等;污染物的种类繁多,其中硝酸盐是各大城市地下水含量普遍较高的指标,以锰为代表的大量重金属元素含量的超标也给城市地下水造成了巨大的威胁。

1.2 国 内

近年来我国城市地下水污染面临的形势同样十分严峻,早在20世纪80年代,国内学者吴静贤、苗长青等针对黑龙江省四市以及吉林省九市的研究表

收稿日期 2014-12-18

基金项目 地下水环境功能区划定方案项目(HCZB-2012-BJ1188)

作者简介:刁徐笑(1990—),女,硕士研究生,研究方向城市地下水污染防治,联系电话:18811430649,电子邮件:dxxxx1990@126.com

联系作者:孙长虹,研究员,电子邮件:changhong_sun@126.com

明,工业“三废”、城市生活污水及废弃物的大量排放,造成了城市地下水的严重污染^[18-19]。

进入 21 世纪,我国城市地下水污染研究的相关报道开始大幅增加,太原市、阳泉市、杭州市和丽江市相继有学者报道地下水污染形势严峻^[20-23]。2008 年全国 195 个城市地下水水质监测结果表明,绝大多数城市的地下水已遭受污染,将近一半的城市地下水污染趋势加重,而且北方城市地下水污染趋势加重的程度要重于南方城市^[9]。据《2012 年中国国土资源公报》,全国 198 个城市共计 4 929 个监测点的地下水水质监测资料显示,水质呈较差级和极差级的监测点共有 2 825 个,占 57.4%,污染趋势加重的监测点有 910 个,占 19.5%,可见我国城市地下水污染问题已经十分突出^[24]。

从上世纪 80 年代起至今,我国城市地下水的污染状况呈现出逐渐加剧的趋势,且北方城市相对南方城市在地下水水质受污强度和受污城市数量等方面更加严重^[25]。

2 城市地下水污染的主要影响因素

由于城市条件下可能存在多种污染途径和污染物,因此影响城市地下水污染的因素相当复杂^[26]。整体来看,城市地下水污染的主要影响因素可以划分为自然因素和人为因素 2 大类别^[6]。

2.1 自然因素

2.1.1 水文地质

不同的水文地质条件会导致城市地下水污染程度有所差异。如位于山前冲洪积平原上的城市和位于滨海河口三角洲的城市,前者含水层上覆的粘性或亚粘性土层较薄,甚至直接裸露于地表,导致污染物极易渗透进入含水层污染地下水;而后的地质岩性主要是由粉细砂和中细砂构成,隔水条件良好,地下水尤其是深层地下水不易受到污染^[27]。

2.1.2 地下水埋深

研究显示,城市中地下水埋深越浅,地下水中污染物的含量增加越快,由此造成浅层地下水污染的风险越大^[28]。这主要是在埋深较浅的情况下,地表污染物易快速穿越包气带进入地下水;而在埋深较深的条件下,地表污染物穿越包气带所需的时间较长,而且包气带本身具有一定的自净能力,再加上过程中污染物易受到包气带中微生物的各种分解作用,因而大大降低了城市地下水的污染风险^[25]。

2.1.3 植被覆盖

植被覆盖能够有效截留降水向地下水的下渗,降低污染物随降水下渗进入地下水的可能性;同时,

地表植被生态系统还可以转移、吸附以及分解部分污染物,致使最终进入地下水的污染物较少,对城市地下水的污染程度也较轻。

2.1.4 气候条件

气候条件对城市地下水的污染形势有着极其重要的作用,包括降水量、气温等众多会对气候造成影响的因素^[29-31]。如在降水较多且频繁的条件下,地表污染物不易积存,同时降水对地表污染物的稀释作用较强,这也是造成我国南方城市地下水污染程度轻于北方城市的原因之一^[25];而在高温干旱条件下,地下水中的硝酸盐、正磷酸盐、氯化物和硫酸盐等含量均会大幅增加,造成污染形势的加剧^[31]。

2.2 人为因素

2.2.1 生活污染源

随着城市规模和人口数量的不断扩张,城市生活污水和垃圾的排放量也在不断增加。据统计,大中城市每天排放生活污水和垃圾总量高达几十万吨,全国已有近 1/3 的城市面临垃圾处理速度远远滞后于增长速度的尴尬处境^[25, 32-33]。此外,城市的医院等特殊行业排放的废弃物中也含有大量的污染物^[34]。上述污染物在不当的收集、输送和处置过程中,均会对城市地下水水质造成严重影响^[5, 12, 19, 35-36]。

2.2.2 城市建设扰动

近年来,城市化进程不断加快,大量城市建设项目的施工对城市地下水环境造成了严重的污染。城市建设对地表土层大幅度的扰动,导致地表各类污染物及可溶性盐等快速进入地下水,再加上城市建设过程中市政基础设施建设滞后,使得大量地表污染物得不到规范处置,进一步加剧了城市地下水的污染^[37-39]。

2.2.3 工业污染源

工业是世界上许多国家尤其是工业强国城市地下水污染首当其冲的原因^[40]。工业污染物的特点是种类繁多、成分复杂,管理不当会对地下水造成严重影响^[1, 5, 19, 25, 39, 41]。但随着近年来国内外环保制度的逐步健全,工业污染对城市地下水的影响在逐步降低。

3 城市地下水污染防治的技术手段

3.1 监测技术

3.1.1 电磁监测

1) 遥感监测技术。地下水遥感监测技术的实质是通过分析遥感图像上与地下水有关的诸如土壤水分、植被等地表信息,来实时监测地下水的污染状况。目前,地下水遥感监测的方法主要有水文地质遥感信息分析法、环境因素遥感信息分析法、热红外遥感

地表热异常监测法以及遥感信息定量反演模型等^[42]。

2) 地质雷达监测技术。地质雷达监测技术是利用地表以下的高频电磁波束反射图形断面来对地下水水质进行探测的一种非破坏性地表原位探查技术,尤其是在地下水有机污染监测方面,具有比传统方法更高的时间效率和更好的经济效益,并且在追踪污染源、确定污染范围等方面更具有全局性^[43]。

3) 电法勘探监测技术。国外针对电法勘探技术应用用于地下水污染监测调查工作的可行性进行了大量的研究和试验,结果表明可行性良好,如可利用电阻率法来圈定地下水的污染范围,利用频谱激发极化法来探测地下水中的有机化学污染等^[6]。

4) 电阻抗断层成像技术。电阻抗断层成像技术是利用对物体表面的电测量来重建反映物体内部结构及功能变化的一种新型计算机影像技术^[44]。利用此技术,可以准确获知地下水中污染羽的分布情况及污染程度,对地下水污染的监测有着重要的意义和价值^[45]。

3.1.2 污染物示踪

1) 人造甜味剂示踪技术。研究表明,被污染的地下水中普遍存在含量较高的安赛蜜等人造甜味剂,安赛蜜与地下水中的氯化污染物及其他大量废水污染物之间强烈的正相关关系表明其在地下水污染监测方面良好的示踪潜力。此外,由于单一的示踪剂无法区分出多种污染物的不同来源,因此,受污地下水中普遍存在的多种人造甜味剂如糖精、蔗糖素以及甜蜜素等均可被作为伴随示踪剂应用到地下水污染监测工作中,以区别导致地下水污染的多种污染物来源^[38,46]。

2) 同位素标记技术。利用多种同位素标记技术可以适时监控地下水的污染状况及水力系统情况,是目前世界上监测城市地下水污染的先进技术手段之一^[35]。如应用氮同位素标记技术,可以在原子水平上识别地下水中氯化物污染源并了解其污染机理^[47];基于氮同位素的不稳定性,可采用氮、氧同位素相结合的技术定性地判别地下水中硝酸盐污染源,识别反硝化过程等^[48]。

3.1.3 替代监测指标

1) 荧光特性监测技术。地下水有机污染物的天然荧光特性可以作为替代监测指标来进一步了解地下水的污染状况。此方法相当灵敏,可以用于开发地下水污染监控的预警系统,并在此预警系统上应用原位传感技术,可做到监测与预报同步,从而大大降低地下水的污染风险和污染程度^[49]。

2) 三卤甲烷生成势(THMFP)监测技术。THMFP

和造成地下水污染主要风险因素之一的溶解性有机碳(DOC)含量具有强烈的正相关性,可以通过测量地下水中的THMFP来替代监测DOC指标,从而定量地分析地下水被工业废水、生活污水等排放所致的非特异性有机污染,是一种很有价值的城市地下水污染监测技术手段^[50]。

3.2 修复技术

按修复方式分类,城市地下水污染的修复技术包括异位修复技术、监测自然衰减技术和原位修复技术。其中,异位修复技术是将受污染的地下水抽出至地表再进行处理的技术,该技术在短期内应用有着处理量大、处理效率高的优点,但长期应用会由于拖尾、反弹等现象的存在而最终降低处理效率,增加处理成本^[51-52];监测自然衰减技术是充分依靠自然净化能力的修复技术,因而需要的修复时间很长^[53]。鉴于以上2种修复技术各自存在的缺陷,原位修复技术便以其修复彻底、处理污染物种类多、所需时间较短、成本相对低廉等优势得到了广泛的应用^[54]。根据修复机理的不同,原位修复技术可划分为可渗透反应格栅修复技术、曝气技术、化学修复技术以及热处理技术等。

3.2.1 可渗透反应格栅修复技术

可渗透反应格栅是一个填充有活性反应介质的原位被动反应区,一般垂直于地下水水流方向安装在地下蓄水层中,当地下水流在自身水力梯度作用下通过格栅时,污染物与反应介质发生吸附、沉淀、过滤和降解等作用而被去除。该技术可以持续原位处理多种污染物,处理效果良好,成本较为低廉,不过该技术也存在拦截污染物不彻底和反应介质易失活等问题^[52,55]。

3.2.2 曝气技术

曝气技术是通过将新鲜空气注入污染区域以下,促使挥发性有机物从地下水中解析到空气流并引至地面上处理的一种新兴地下水中可挥发性有机物的原位修复技术,具有效率高、成本低、安装操作方便、对修复场地干扰小等优点^[51-52]。然而,该技术对于非挥发性的有机污染物以及承压水层的污染物不适用,而且不适合在低渗透率或高黏土含量的地区使用,此外,控制不当还可能导致地下水中污染羽迁移,造成二次污染等^[52,56]。

3.2.3 化学修复技术

常见的化学修复技术有原位化学氧化技术和电化学动力修复技术^[52,57]。

原位化学氧化是将化学氧化剂引入到地下,通过氧化还原作用去除地下水中污染物的技术,具有保护地上结构、所需周期短及处理效果好等优点,但

在应用时要注意控制化学药剂的使用量,以免过量投加造成生态环境的破坏^[51-58]。

电化学动力修复技术是利用电渗析、电迁移和电泳等电化学原理使地下水中的荷电离子或粒子在电场的作用下发生定向迁移,然后在设定的处理区进行集中修复处理的技术^[51-59]。该技术能够高效去除地下水中的重金属离子和有机污染物,受水文地质条件和污染深度限制相对较小,但还需要更多的实验数据和示范工程来验证污染物迁移过程机理及限制因素等方面^[59-60]。

3.2.4 热处理技术

原位热处理是通过向土壤输送热量来提高地下水温度,加热地下水中的有机污染物使其发生移动或流通,并利用收集井收集后输送到地表,再通过常规的地面修复手段对污染物进行处理的技术。该技术可以有效提升挥发性和半挥发性污染物的去除效率,然而,对于设备及运行成本、系统施工及运行专业化程度要求较高,较难实现推广和实施^[61]。

3.2.5 生物修复技术

生物修复技术是一种利用特定生物的吸收、吸附、转化和降解等作用净化地下水中污染物的修复技术^[52]。成本相对低廉,对环境的影响较小,持续时间长,属于生态友好型的地下水环境治理技术^[62]。但存在工艺流程复杂且操作条件不易控制的技术难题,今后应加大这方面的研究力度。

4 展望与建议

城市地下水污染未来研究的热点。城市地下水中的有机污染物因其种类繁多、含量较小、不易检出等特点,使得地下水的有机污染有望成为当今国内城市地下水污染研究领域的热点问题。其中,加油站埋地储罐的渗漏是造成地下水有机污染最大的潜在污染源,据统计,石油烃和卤代溶剂如苯、甲苯、二甲苯、三氯乙烯和四氯乙烯等是地下水中检出率较高的有机污染物,有着极大的危害性。另外,城市中大量新兴有机物对地下水造成的污染也已得到国内外学者的普遍关注。

城市地下水污染监测技术方面。研究和开发城市地下水多级监测系统应是我国未来地下水监测技术的重要发展方向,应进一步补充和完善地下水监测井网,逐步建立地下水动态监测与分析预测服务体系,对重点污染地区(段)进行重点监测,综合利用多种监测技术相结合的方式提高监测精度,同时还应建立全国地下水污染预警与应急预案机制,建立完善的地下水污染应急保障体系,实现对大区域

范围内的地下水污染信息的实时监控和对地下水污染严重地区的及时预报,为更加高效有序地监测城市地下水污染提供强有力的技术支持。

城市地下水污染修复技术方面。城市地下水污染的生物修复技术将是未来研究的重点领域,理应受到越来越多的关注,如增加对微生物的培养,加强对新型微生物的探究以及集成采用多种地下水生物修复方法,可实现大范围、低成本的地下水污染治理。此外,多种地下水修复技术综合使用,可起到互相补充及促进的效果,更加有利于城市地下水质的改善和恢复。

参考文献:

- [1] Leung C, Jiao J J. Heavy metal and trace element distributions in groundwater in natural slopes and highly urbanized spaces in Mid-Levels area, Hong Kong[J]. Water Research, 2006, 40(4): 753-767.
- [2] 郝华. 我国城市地下水污染状况与对策研究[J]. 水利发展研究, 2004, 4(3): 23-25.
- [3] 国务院常务会议讨论通过《全国地下水污染防治规划》[J]. 给排水, 2011, 27(10): 80.
- [4] 陈鸿汉, 刘明柱. 永葆地下清流——《全国地下水污染防治规划》的实施建议[J]. 环境保护, 2012(4): 23-26.
- [5] 罗兰. 我国地下水污染现状与防治对策研究[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2008, 8(2): 72-75.
- [6] 张新钰, 辛宝东, 王晓红, 等. 我国地下水污染研究进展[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 415-422.
- [7] 陈淑峰, 李唯, 胡克林, 等. 基于 GIS 的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3541-3547.
- [8] Jeong C H. Effect of land use and urbanization on hydrochemistry and contamination of groundwater from Taejon area, Korea[J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1/4): 194-210.
- [9] Navarro A, Carbonell M. Evaluation of groundwater contamination beneath an urban environment: The Besòs river basin (Barcelona, Spain)[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(2): 259-269.
- [10] Rivett M O, Turner R J, Glibbery Née Murcott P, et al. The legacy of chlorinated solvents in the Birmingham aquifer, UK: Observations spanning three decades and the challenge of future urban groundwater development[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2012, 140: 107-123.
- [11] Hasenmueller E A, Criss R E. Multiple sources of boron in urban surface waters and groundwaters [J]. Science of the Total Environment, 2013, 447: 235-247.
- [12] Foppen J W A. Impact of high-strength wastewater infiltration on groundwater quality and drinking water supply: the case of Sana'a, Yemen[J]. Journal of Hydrology, 2002, 263(1/4): 198-216.
- [13] Zingoni E, Love D, Magadza C, et al. Effects of a semi-formal urban settlement on groundwater quality: Epworth (Zimbabwe): Case study and groundwater quality zoning[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(11/16): 680-688.
- [14] Heredia O S, Cirelli A F. Trace elements distribution in soil, pore water and groundwater in Buenos Aires, Argentina[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 409-414.
- [15] Kazemi G A. Impacts of urbanization on the groundwater resources in Shahrood, Northeastern Iran: Comparison with other Iranian and Asian cities[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2011,

- 36(5/6):150-159.
- [16] Srinivasan V, Seto K C, Emerson R, et al. The impact of urbanization on water vulnerability: A coupled human-environment system approach for Chennai, India[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(1):229-239.
- [17] Devic G, Djordjevic D, Sakan S. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia[J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 468:933-942.
- [18] 吴静贤,姚丽.黑龙江四城市地下水污染与防治[J]. *环境科学丛刊*, 1984(7):49-54.
- [19] 苗长青,牟淑琴.吉林省城市地下水污染状况及防治途径[J]. *吉林地质*, 1984(2):41-45.
- [20] 蒋方媛,郭清海.城市地下水污染成因分析—以山西省太原市为例[J]. *东华理工大学学报:自然科学版*, 2009, 32(1):82-88.
- [21] 王桃良.阳泉市地下水水质评价及趋势预测[J]. *山西水利科技*, 2004(3):77-78.
- [22] 金赞芳,王飞儿,陈英旭,等.城市地下水硝酸盐污染及其成因分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):252-258.
- [23] 庄立会,张碧星,暴向平,等.丽江市城市地下水环境评价及可持续利用研究[J]. *环境科学导刊*, 2007, 26(1):76-79.
- [24] 中华人民共和国国土资源部. 2012 中国国土资源公报[N]. *中国国土资源报*, 2013-04-20.
- [25] 王克三.我国主要城市地下水污染问题初探[J]. *环境科学丛刊*, 1984(5):13-17.
- [26] Chisala B N, Tait N G, Lerner D N. Evaluating the risks of methyl tertiary butyl ether (MTBE) pollution of urban groundwater[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, 91(1/2):128-145.
- [27] 乐美煜.我国主要城市地下水污染原因的初步分析[J]. *水文地质工程地质*, 1980(6):45-47.
- [28] 李平,齐学斌,亢连强,等.不同潜埋深再生水灌溉夏玉米氮素运移试验研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2):164-168.
- [29] Green T R, Taniguchi M, Kooi H, et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 405(3/4):532-560.
- [30] Howard G, Pedley S, Barrett M, et al. Risk factors contributing to microbiological contamination of shallow groundwater in Kampala, Uganda[J]. *Water Research*, 2003, 37(14):3421-3429.
- [31] Kampbell D H, An Y, Jewell K P, et al. Groundwater quality surrounding Lake Texoma during short-term drought conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 125(2):183-191.
- [32] 李君,常莉.我国城市地下水污染状况与治理对策[J]. *开封大学学报*, 2006, 20(4):89-91.
- [33] 赵章元.地下水污染不容忽视[J]. *环境经济*, 2006(4):37-38.
- [34] Emmanuel E, Pierre M G, Perroin Y. Groundwater contamination by microbiological and chemical substances released from hospital wastewater: Health risk assessment for drinking water consumers[J]. *Environment International*, 2009, 35(4):718-726.
- [35] Hosono T, Ikawa R, Shimada J, et al. Human impacts on groundwater flow and contamination deduced by multiple isotopes in Seoul City, South Korea[J]. *Science of The Total Environment*, 2009, 407(9):3189-3197.
- [36] 张红梅,速宝玉.垃圾填埋场渗滤液及对地下水污染研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(6):110-115.
- [37] Foster S S D. The interdependence of groundwater and urbanisation in rapidly developing cities[J]. *Urban Water*, 2001, 3(3):185-192.
- [38] Van Stempvoort D R, Roy J W, Brown S J, et al. Artificial sweeteners as potential tracers in groundwater in urban environments[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 401(1/2):126-133.
- [39] Jamin P, Dollé F, Chisala B, et al. A regional flux-based risk assessment approach for multiple contaminated sites on groundwater bodies[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, 127(1/4):65-75.
- [40] Bauer S, Bayer-Raich M, Holder T, et al. Quantification of groundwater contamination in an urban area using integral pumping tests[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 75(3/4):183-213.
- [41] 赵永锋,隋永顺.白城市地下水质量现状与发展趋势[J]. *吉林地质*, 1994(3):76-80.
- [42] 吾拉木阿布都瓦斯提,秦其明.地下水遥感监测研究进展[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1):184-188.
- [43] 周迅,姜月华.地质雷达在地下水有机污染调查方面的应用研究进展[J]. *地下水*, 2007, 29(2):81-85.
- [44] 徐桂芝,杨硕,李颖,等.电阻抗断层成像技术综述[J]. *河北工业大学学报*, 2004, 33(2):35-40.
- [45] 朱雪强,韩宝平,尹儿琴.地下水 DNAPLs 污染的研究进展[J]. *四川环境*, 2005, 24(2):65-70.
- [46] Van Stempvoort D R, Roy J W, Grabuski J, et al. An artificial sweetener and pharmaceutical compounds as co-tracers of urban wastewater in groundwater[J]. *Science of The Total Environment*, 2013, 461:348-359.
- [47] 周爱国,李小倩,刘存富,等.氯代挥发性有机物(VOCs)氯同位素测试技术及其在地下水污染中的应用研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(4):342-349.
- [48] 周迅,姜月华.氮、氧同位素在地下水硝酸盐污染研究中的应用[J]. *地球学报*, 2007, 28(4):389-395.
- [49] Stedmon C A, Sereďyń ska-Sobecka B, Boe-Hansen R, et al. A potential approach for monitoring drinking water quality from groundwater systems using organic matter fluorescence as an early warning for contamination events[J]. *Water Research*, 2011, 45(18):6030-6038.
- [50] Stuart M E, Goody D C, Kinniburgh D G, et al. Trihalomethane formation potential: a tool for detecting non-specific organic groundwater contamination[J]. *Urban Water*, 2001, 3(3):173-184.
- [51] 陈慧敏,仵彦卿.地下水污染修复技术的研究进展[J]. *净水技术*, 2010, 29(6):5-8.
- [52] 井柳新,程丽.地下水污染原位修复技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2010, 36(7):6-9.
- [53] 渠光华,胡澄.地下水中 BTEX 自然衰减的研究进展[J]. *广西轻工业*, 2008, 24(5):84-85.
- [54] 冉德发,王建增.石油类污染地下水的原位修复技术方法论述[J]. *探矿工程:岩土钻掘工程*, 2005, 32(S1):206-208.
- [55] 廉新颖,王鹤立,漆静娴,等.突发性重金属污染地下水应急处理技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2010, 36(11):11-14.
- [56] 范伟,杨悦锁,陈力,等.地下水污染曝气修复技术进展[J]. *水资源保护*, 2010, 26(6):84-88.
- [57] Hashim M A, Mukhopadhyay S, Sahu J N, et al. Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10):2355-2388.
- [58] 纪录,张晖.原位化学氧化法在土壤和地下水修复中的研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(6):37-42.
- [59] 张锡辉,王慧,罗启仕.电动力学技术在受污染地下水和土壤修复中新进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(2):249-255.
- [60] 刘庆生,邱廷省.受污染土壤及地下水修复的新进展[J]. *能源环境保护*, 2004, 18(5):25-28.
- [61] 缪周伟,吕树光,邱兆富,等.原位热处理技术修复重质非水相液体污染场地研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(8):63-68.
- [62] 黄国强,李鑫钢,李凌,等.地下水有机污染的原位生物修复进展[J]. *化工进展*, 2001, 20(10):13-16. (下转第 23 页)

- [24] 张丽丽,管运涛,赵婉婉,等.用一体化生物膜反应器处理生活污水[J].清华大学学报:自然科学版,2007(6):822-825.
- [25] 程可红,马崑文,王金泉,等.低氧状态下生物膜法废水处理中丝状菌膨胀特性研究[J].工业用水与废水,2009(2):42-45.
- [26] 曹文平,朱伟萍,张永明,等.曝气生物滤池工艺中丝状菌孳生的成因和防治措施[J].水处理技术,2008,34(3):77-80.
- [27] 邢建晶.新型序批式生物膜反应器中污泥膨胀的研究[J].环境工程学报,2010,4(7):1541-1545.
- [28] 吴昌永,王然登,彭永臻.污水处理颗粒污泥技术原理与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [29] Chudoba J. Control of activated sludge filamentous bulking formulation of basic principles[J].Water Research,1985,19(8):1017-1022.
- [30] 王芳.SBAR 中好氧颗粒污泥的培养及其特性研究[D].大连:大连理工大学,2004.
- [31] 高景峰,苏凯,张倩,等.底物种类和浓度对好氧颗粒污泥丝状菌膨胀的影响[J].北京工业大学学报,2011,37(7):1027-1032.
- [32] 吴蕾,彭永臻,王淑莹,等.好氧聚磷颗粒污泥的培养与丝状菌膨胀控制[J].北京工业大学学报,2011,37(7):1058-1066.
- [33] De Kreuk M, J H J, van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering,2005,90(6):761-769.
- [34] Krishna C, Van Loosdrecht M C M. Effect of temperature on storage polymers and settleability of activated sludge[J].Water Research, 1999,33(10):2374-2382.
- [35] 苟莎,黄钧.异养硝化好氧颗粒污泥培养条件研究[J].环境科学, 2009,30(12):3645-3651.
- [36] 王强.选择压法培育好氧颗粒污泥的试验[J].环境科学,2003,24(4): 99-104.
- [37] 王超.剪切应力对好氧颗粒污泥形态结构和微生物活性的影响机制研究[J].环境科学,2008,29(8):2235-2241.
- [38] 李志华,刘超,赵静,等.丝状菌颗粒污泥形成过程及其对膨胀控制的启示[J].中国给水排水,2013,29(13):23-27.

CONTROL AND APPLICATION OF FILAMENTOUS BACTERIA IN WASTEWATER TREATMENT

Su Xueying, Fu Kunming

(Key Laboratory of Urban Storm water System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to study the effect of filamentous bacteria on wastewater treatment systems, functions of filamentous bacteria in activated sludge process, biofilm process, and granular sludge process were analyzed respectively. During traditional activated sludge process, it was found that the appearance of filamentous bacteria does not result in sludge bulking all the time. However, if the amount of filamentous bacteria was too large, then sludge bulking appeared, which would cause serious sedimentation problems. During biofilm process, filamentous bacteria was helpful to wastewater treatment except to biological aerated filter (BAF), and filamentous bacteria should be avoid in BAF process as much as possible. During granular sludge process, some filamentous bacteria was useful to form granules, however, too much filamentous bacteria may cause effluent deterioration and break-up of granules. Different strategies were suggested here under different types of sludge bulking. At meanwhile, a further research for sludge bulking, especially for limited sludge bulking was proposed to improve water quality in effluent.

Keywords: filamentous bacteria; activated sludge; sludge bulking; biofilm; granular sludge

(上接第 18 页)

PROGRESS IN RESEARCH ON CONTAMINATION PREVENTION OF URBAN GROUNDWATER

Diao Xuxiao^{1,2}, Sun Changhong², Chen Shufeng², He Wei²

(1.College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, 100048;
2.Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, 100037; Beijing, China)

Abstract: The situation of groundwater contamination in cities at home and abroad was reviewed, the main factors which affected groundwater contamination in cities was introduced, and the prevention and control technologies of urban groundwater contamination was expounded emphatically, which mainly included electromagnetic monitoring technology, pollutant tracer technology, alternative monitoring index technology, permeable reactive barriers repair technology, aeration technology, chemical remediation technology, heat treatment technology, bioremediation technology, etc. Clarifying the future hotspot direction of urban groundwater pollution research will be the urban groundwater organic pollution, especially gas station underground storage tank leakage pollution. Research and development on multi-stage groundwater system should be the hot topic in the future in China. Biological repairing technology for urban groundwater pollution would be the key direction in the future research of groundwater pollution repairing technology.

Keywords: urban; groundwater; influence factor; contamination prevention

从无到有 从弱到强 海水淡化技术走出国门